

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки

(повна назва інституту/факультету)

Акустики та акустоелектроніки

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Дідковський В.С.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності (спеціалізації) 6.050803 Акустотехніка

(код та назва спеціальності)

на тему: Акустичний проект клубу «Otel''' м. Київ

Виконав: студент 4 курсу, групи ДГ-51

(шифр групи)

Петренко Григорій Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник зав. кафедри д.т.н. проф. Дідковський В.С.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант

(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

(підпис)

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет _____ електроніки
(повна назва)

Кафедра _____ акустики та акустoeлектроніки
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) _____ 6.050803 Акустотехніка
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Дідковський В.С.
(підпис) (ініціали, прізвище)
«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект (роботу) студенту
Петренко Григорій Андрійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Акустичний проект клубу «Otel''' м. Київ

керівник проекту (роботи) _____ Дідковський В.С. д.т.н. зав. кафедри _____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____ 6 червня

3. Вихідні дані до проекту (роботи) методи вимірювання та розрахунку акустичних характеристик приміщення, обробка отриманих даних для надання рекомендацій про покращення акустичних характеристик, розміри та матеріали приміщення

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити) _____

1. Аналіз факторів, що впливають на акустику приміщень

2. Звукоізоляція приміщень

3. Акустичний проект клубу

4. Звукоізоляція приміщення клубу

5. Розрахунок акустики головного танцполу

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) презентація

6. Консультанти розділів проекту (роботи)*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 5 вересня 2018 р

Календарний план

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1.	Ознайомлення з літературними джерелами	15.09.18 – 25.09.18	
2.	Аналіз теорії архітектурної акустики	20.09.18 – 01.11.18	
3.	Розрахунок розмірів приміщення, визначення оздоблювальних матеріалів	01.11.18 – 15.11.18	
4.	Розрахунок акустики приміщення	15.11.18 – 30.11.18	
5.	Розрахунок звукоізоляції	30.11.18 – 16.12.18	

Студент

(підпис)

Г.А. Петренко
(ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

В.С. Дідковський

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту (роботи)

РЕФЕРАТ

Акустичний проект клубу «Otel'» у м. Київ///// Дипломна робота на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр» Петренко Г.А. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», факультет електроніки, кафедра акустики та акустoeлектроніки, група ДГ-51. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019.

Сторінок –61, рисунків – 20, таблиць. – 4.

Метою роботи є покращення акустичних характеристик приміщення.

Робота охоплює аналіз факторів, що впливають на акустику приміщень, огляд звукоізоляції в приміщеннях. Розрахунок акустичних параметрів для приміщень, розрахунок шумоізоляції.

Результатом роботи є розробка акустичного проекту майданчика для виступів та заходів «Otel'»

В ході роботи заміряні акустичні параметри реального приміщення, яке до цього проектувалося як частина ткацької фабрики, та запропоновані способи для покращення акустики залу та її відповідності до вимог проектування залів даного типу.

Розрахована звукоізоляція приміщення від сторонніх шумів та запропоновані методи боротьби з ними.

Ключові слова: час реверберації, коефіцієнт поглинання, звукоізоляція, акустичний проект.

ABSTRACT

Acoustic project of club «Otel'» located in Kiev//// Thesis for a degree of higher education "Bachelor". Petrenko H. A. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute", Faculty of Electronics, Department of acoustics and acoustoelectronics, group DG-51. – K: Igor Sikorsky Kyiv politechnic institute, 2019.

Pages – 60, figures – 20, tables – 4.

The purpose of the work is to improve the acoustic characteristics of the room.

The work covers the analysis of factors influencing the acoustics of premises, an overview of sound insulation in the premises. Calculation of acoustic parameters for premises, calculation of sound insulation.

The result of the work is the development of an acoustic project for club "Otel`"

In the course of work was measured acoustic parameters of real premises, which before that was designed as part of the weaving factory, and proposed ways to improve the acoustics of the room and its compliance with the design requirements of the rooms of this type

The sound insulation of the room from outside noise and the proposed methods of combating them are calculated.

Keywords: reverberation time, absorption coefficient, sound insulation, acoustic design.

Зміст

Вступ.....	7
РОЗДІЛ 1. Свідчення про архітектурну акустику.....	9
1.1. Основні методи розрахунку звукового поля.....	8
1.2. Фактори, які визначають акустику залів.....	15
1.3. Вплив форми залів на утворене звукове поле.....	21
РОЗДІЛ 2. Звукоізоляція в приміщеннях.....	26
2.1. Види шумів і звукоізоляційні норми.....	27
2.2. Ізоляція повітряного шуму спеціальними конструкціями.....	29
2.2.1. Звукоізоляція одношаровими конструкціями.....	30
2.2.2. Звукоізоляція конструкціями з отворами.....	32
РОЗДІЛ 3. Акустичний проект.....	34
3.1. Загальні відомості.....	35
3.2. Методика проведення акустичних вимірювань.....	37
3.3. Результати натурних вимірювань і оцінка акустичних характеристик залу театру.....	39
3.3.1. Час реверберації.....	39
3.3.2. Структура відбиття звуку в залі.....	42
3.4. Енергетичні характеристики залу.....	49
3.5. Звукоізоляція приміщення	52
3.6 Рекомендації.....	53
Висновок.....	55
Список літератури.....	57
Додаток.....	58

ВСТУП

Ми живемо в світі звуків. Хоч ми дуже часто не помічаємо деяких звуків, голосів на вулиці, машин за вікном, але наш організм постійно їх відчуває і це зовсім не корисно. Тому неймовірно важливо контролювати звукові процеси. Міста, будівлі, квартири будують із декотрим акустичним планом.

Архітектурна акустика (або акустика приміщень) – одне з важливих напрямків сучасної акустики, що вивчає закони поширення звуку в приміщеннях, відображення і поглинання звукових хвиль різними поверхнями, а також вплив відбитих звукових хвиль на сприйняття мови (музики). Основи архітектурної акустики були закладені американським вченим Вільямом Себіна (кінець XIX - початок XX ст.)

Основне завдання архітектурної акустики - дослідження умов, що визначають чутність мови або музики в приміщеннях, і розробка архітектурно-планувальних і конструктивних рішень, що забезпечують оптимальні умови слухового сприйняття.. Питання звукоізоляції конструкціями, що захищають та знижують рівень шуму в будівлях вивчає будівельна акустика.

Коли в закритій аудиторії звучить мова, то кожен її склад, який представляє собою короткий звуковий імпульс, доходить до слухача не тільки по прямій лінії, а й по шляхах, багаторазово зламаним завдяки віддзеркаленням звуку від стін, стелі та підлоги приміщення. При кожному відбитті імпульсу від обмежуючих приміщення поверхонь деяка частина звукової енергії поглинається; тому при кожному сказаному складі вухо слухача сприймає послідовний ряд імпульсів з поступово спадною інтенсивністю. Неважко зрозуміти, що, якщо поглинання звуку невелике, то відгук відбувається дуже повільно, причому наявність імпульсів, які ще не відлунали сильно заважає розбірливості чергових складів зв'язного мовлення. У цьому випадку приміщення виявляється надмірно гучним, іноді в такій мірі, що мова стає абсолютно нерозбірливою.

Вищевикладене зберігає своє значення і в застосуванні до приміщень, призначених для слухання музики. Кожен такт музичного твору, кожна музична фраза являють собою послідовності звукових імпульсів, що піддаються в аудиторії процесу поступового відгуку. Зрозуміло, що при зтягнутому відгуку фон, що виходить при суперпозиції ряду повільно затихаючих імпульсів, порушує нормальне сприйняття музики тим сильніше, чим швидше темп музичного твору. На прикладі музики легко усвідомити собі і іншу сторону справи: акустичним дефектом приміщення може з'явитися не тільки надмірна тривалість відгуку, але також і недостатня його тривалість.

У даній роботі проводиться акустичний розрахунок приміщення, призначеного для музичного залу. При цьому задача полягає в тому, що приміщення не проектувалося для даного використання. Тому, з одного боку, потрібно розрахувати акустичні показники так, щоб приміщення було придатним для проведення концертів, вечірок, лекцій та кіносеансів, а з іншого – розрахувати звукоізоляцію.

РОЗДІЛ 1. Свідчення про архітектурну акустику

1.1 Основні методи розрахунку звукового поля

Існуючі методи розрахунку параметрів звукового поля засновані на хвильовій, геометричній і статистичній акустиці [1]. Теорія хвильової акустики розглядає два режими коливань повітряного обсягу: один - як власні затухаючі, інший - як вимушені під дією якого-небудь джерела. В декартових координатах хвильове рівняння для тривимірного простору має вигляд:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \quad (1)$$

де p - звуковий тиск в середовищі; c – швидкість звуку; t – час.

Повітряний об'єм приміщення являє собою коливальну систему з розподіленими параметрами, що володіє деяким спектром власних частот. Визначення власних частот коливань просто вирішується лише для прямокутних приміщень з жорсткими огорожувальними поверхнями:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}, \quad (2)$$

де n - параметри; l - розміри приміщення.

Кожній трійці значень цілочисельних параметрів n_x, n_y, n_z відповідає певна частота коливань повітряного обсягу.

Аналіз виразу (2) показує, що в області низьких частот, відповідних малим значенням чисел власні частоти коливань відокремлені один від одного порівняно великими інтервалами, мають дискретну структуру. В області високих частот спектр ущільнюється і число власних коливань швидко збільшується. Якщо розміри приміщення не дуже малі, то власні частоти розташовуються так щільно, що будь-який компонент в спектрі джерела звуку

збуджує цілий ряд власних коливань повітряного обсягу з частотами, мало відрізняються від частоти збуджуючої компоненти. Чим менше розміри приміщення, тим в більшому діапазоні частот будуть 11 спостерігатися резонансні явища і збільшуватися нерівномірність звукового поля. Розрахунок звукового тиску для області середніх і високих частот (при великих значеннях) досить скрутний.

геометричній акустиці при розгляді відображення звукових хвиль від поверхонь приміщення використовують поняття фронт хвилі і звукові промені (лінії, перпендикулярні фронту хвилі в усіх його точках), які вказують напрям поширення звукової хвилі. Дія відбитих від внутрішніх поверхонь звукових променів часто замінюється дією уявних джерел з відповідним зменшенням їх потужності, пропорційним коефіцієнту відображення цієї поверхні. Уявне джерело звуку розташоване на перпендикулярі до поверхні і на такій же відстані від неї, що і дійсне джерело звуку.

Шлях звукового променю, багаторазово відбитого від граней прямокутного паралелепіпеда, може бути представлений в розгорнутому зображенні в двох або трьох проекціях на площині паралельно граням паралелепіпеда. Знаючи швидкість поширення звуку, можна визначити запізнення одного звукового променю по відношенню до іншого, виявити різні акустичні дефекти приміщень. Така побудова поширення звукових променів називається променевим ескізом [2].

Допустимість застосування геометричної акустики залежить від довжини звукової хвилі, розмірів поверхні, що відбиває і її розташування по відношенню до джерела звуку і вашій місцевості. Відображення звукових хвиль можна вважати спрямованим, якщо найменший розмір відбиваючої поверхні не менше ніж в 1,5 рази перевищує довжину хвилі. При невиконанні цієї умови звукові хвилі розсіюються і побудова відбитих звукових променів втрачає сенс. Для криволінійних поверхонь найменший радіус кривизни

повинен бути не менше ніж в два рази більше довжини хвилі. Крім того, геометрична акустика справедлива лише в разі незалежності коефіцієнта віддзеркалення від кута падіння звукового променя.

При незначному звукопоглинанні через кожну точку в об'ємі приміщення одночасно проходить велика кількість відбитих звукових хвиль, що поширюються по всіляких напрямках. Статистична акустика передбачає, що напрямки, амплітуди і фази накладених одна на одну хвиль розподілені більш-менш хаотично, що дає можливість розглядати ці хвилі як некогерентні і вважати, що щільність звукової енергії в кожній точці є сума щільності енергії кожної з цих хвиль, тобто застосовувати метод енергетичного підсумовування.

Таким чином, статистична теорія акустики заснована на припущенні, що в приміщенні під дією джерела звуку виникає звукове поле, близьке до дифузного, що характеризується тим, що у всіх точках поля усереднені в часі рівень звукового тиску і потік, що проходить по будь-якому напрямку звукової енергії постійні.

Для обліку звукопоглинання приймається величина середнього коефіцієнта звукопоглинання

$$\alpha_{cp} = \frac{A_{общ}}{S_{общ}}, \quad (3)$$

де $S_{общ}$ - сумарна площа огорожувальних поверхонь.

Статистична теорія також розглядає середню довжину шляху між відображеннями, тобто величину середнього пробігу звукової хвилі, що залежить від об'єму приміщення V . Якщо за час t в точку приміщення приходить n відображень, а відрізок часу між двома наступними відображеннями в середньому дорівнює t_1 , то $n = \frac{t}{t_1}$, а середня довжина шляху

$l_{cp} = t_1 c$ (c – швидкість поширення звуку). Величина l_{cp} залежить від форми приміщення, однак для практичних цілей може бути прийнята постійною:

$$l_{cp} = \frac{4V}{S_{общ}}, \quad (4)$$

Якщо процеси випромінювання й поглинання звуку відбуваються безперервно, то диференціальне рівняння, що описує режим динамічної рівноваги, матиме вигляд [3]:

$$V \frac{d\varepsilon}{dt} = W - A_{общ}, \quad (5)$$

де ε - щільність звукової енергії; W - потужність, яку випромінює джерело; $A_{общ}$ - енергія, що поглинається поверхнями приміщення.

Для випадку рівноімовірного приходу звукової енергії в будь-яку точку об'єму з всіх напрямків кількість енергії, що падає на 1 см^2 поверхні в секунду, дорівнює:

$$I = \frac{1}{4} \varepsilon c, \quad (6)$$

Величина

$$A_{общ} = \frac{1}{4} \varepsilon c \alpha_{cp} S_{общ}, \quad (7)$$

Після підстановки (7) в (6), інтегрування і деяких перетворень можна отримати:

$$\varepsilon_0 = \frac{4W}{\alpha_{cp} c S_{общ}} = \frac{4W}{c A_{общ}}, \quad (8)$$

Процес загасання звуку після виключення джерела (реверберація) настане при $W = 0$, тоді:

$$W \frac{d\varepsilon}{dt} = -\varepsilon \frac{c \alpha_{cp} S_{общ}}{4} \quad (10)$$

Інтегруючи і підставляючи граничні умови $\varepsilon = \varepsilon_0$ при $t = 0$ отримаємо:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{-\frac{c S_{общ}}{4V} \ln(1 - \alpha_{cp}) t} \quad (11)$$

Час, протягом якого відбувається загасання звуку, називається часом реверберації. Цей процес відбувається внаслідок багаторазових відображень звукових хвиль від огорожувальних поверхонь.

В якості еталону прийнято час загасання щільності енергії в 10^6 разів (або зменшення рівня звукового тиску на 60 дБ); цей час називається часом стандартної реверберації.

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = e^{-\frac{cS_{\text{общ}}}{4V} \ln(1-\alpha_{\text{ср}})T} = 10^{-6}$$

або

$$\frac{\alpha_{\text{ср}} S_{\text{общ}} c}{4V} = T \lg(e) = 6$$

Звідси

$$T = 0.161 \frac{V}{\alpha_{\text{ср}} S_{\text{общ}}} = 0.161 \frac{V}{A_{\text{общ}}}, \quad (12)$$

Тобто час реверберації залежить тільки від об'єму приміщення і еквівалентної площі звукопоглинання в ньому.

Процес наростання рівня відбувається дуже швидко і тому не грає тієї великої ролі в оцінці акустичних якостей приміщень, яку надає процес загасання звуку. Статистичний підхід до оцінки звукових полів має велике значення при вирішенні практичних завдань боротьби з шумом [4].

Так як, $I = \frac{4W}{A_{\text{общ}}}$, то рівень інтенсивності, тобто $L_1 = 10 \lg \frac{I}{I_0}$ буде:

$$L_1 = L_W - 10 \lg A_{\text{общ}} + 6, \quad (13)$$

При стандартних атмосферних умовах рівень звукового тиску L дорівнює рівню інтенсивності звуку, тому

$$L = L_W - 10 \lg A_{\text{общ}} + 6, \quad (14)$$

Вирази (13) і (14) справедливі для дифузного звукового поля. Зазвичай в приміщеннях можна виділити щільність енергії прямого $\varepsilon_{\text{пр}}$ і відбитого $\varepsilon_{\text{отр}}$

від всіх поверхонь звуку. Тоді загальна щільність звукової енергії в приміщенні буде дорівнювати $\varepsilon = \varepsilon_{\text{пр}} + \varepsilon_{\text{отр}}$.

Щільність звуковий енергії прямого звуку при сферичному випромінюванні на відстані від джерела дорівнює: [3]

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{W}{4\pi r^2 c}, \quad (15)$$

Щільність дифузійної звуковий енергії після врахування втрат енергії при першому відображенні звуку від поверхонь

$$\varepsilon_{\text{отр}} = \frac{4W}{cS_{\text{общ}}} \left(\frac{1-a_{\text{ср}}}{a_{\text{ср}}} \right) = \frac{4W(1-a_{\text{ср}})}{cA_{\text{общ}}} \quad (16)$$

Загальна щільність звукової енергії:

$$\varepsilon = \frac{W}{4\pi r^2 c} + \frac{4W(1-a_{\text{ср}})}{cA_{\text{общ}}} \quad (17)$$

Відповідно до (17) поблизу джерела рівень зменшується на 6 дБ при збільшенні відстані в два рази. Зона відбитого звуку визначається величиною граничного радіусу $r_{\text{пр}}$, тобто відстанню від джерела, на якому рівні звукового тиску відбитого і прямого звуку рівні [5]:

$$r_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{A_{\text{общ}}}{50(1-a_{\text{ср}})}} \quad (18)$$

Узагальнюючи вищевикладене, можна зробити наступні висновки. Хвильова теорія акустики дозволяє отримати точні рішення. Однак складність математичного апарату і великі витрати часу на розрахунки обмежують її застосування діапазоном низьких частот, тим більше що в цьому діапазоні інші методи неприйнятні.

Не набула великого поширення і геометрична акустика внаслідок уявній складності і недостатньої розробки. Геометрична акустика дає не тільки наочне уявлення про характер поширення звуку, але і дозволяє кількісно оцінити такі питання, як нерівномірне розташування звукопоглиначів, вплив розмірів і форми приміщення на ефективність заходів боротьби з шумом та ін.

Статистична акустика дозволяє досить точно вирішувати завдання для приміщень з малим звукопоглинанням і для діапазону високих частот. Для приміщень, в яких довжина, ширина і висота змінюються в широких межах (наприклад, в виробничих будівлях), а також мають нерівномірне розташування звукопоглиначів, поширення звуку не відповідає законам статистичної акустики. Однак з урахуванням різних емпіричних поправок статистична акустика дозволяє найбільш просто вирішувати практичні завдання, тому вона набула найбільшого поширення.

1.2 Фактори, які визначають акустику залів

В приміщеннях, призначених для прослуховування мови, основне значення має її розбірливість. Слід зазначити, що чутність і розбірливість мови – це різні поняття. Мова може звучати дуже голосно і бути прекрасно чутна, але бути при цьому зовсім нерозбірливою (наприклад, у залах вокзалів, аеропортів).

Відповідно до міжнародних стандартів, під розбірливістю розуміють ступінь, з яким мова може бути зрозуміла слухачам. При цьому зовсім оцінюють відсоток артикуляції $A\%$, тобто відсоток вірно зрозумілих фраз, слів та складів і фонем. Відповідно до цього розрізняють види розбірливості: фонемну, складову, словесну і фразову. Всі вони пов'язані між собою і можуть бути перераховані одна в одну.

Тому артикуляція є суб'єктивним критерієм. Для визначення розбірливості користуються експериментальним методом [1]. Диктор поволі читає таблиці односкладових, таких, що не мають сенсу складів (складова розбірливість) або фраз (розбірливість фраз), і слухачі, що знаходяться в різних точках зал, записують їх. У залах, в яких складова артикуляція рівна 85—96%, розбірливість мови вважається відмінною; якщо артикуляція знаходиться в межах 75—85%, розбірливість вважається хорошою; 65—75% — задовільною; менше 65% — розбірливість мови незадовільна.

Незадовільній розбірливості мови, тобто 60—65% складовій артикуляції, відповідає приблизно 80% розбірливості фраз, а задовільною розбірливістю — приблизно 90% розбірливості фраз.

Найбільш показовою є складова розбірливості, за нею звичайно і оцінюється приміщення.

Процес реверберації в приміщенні виявляється критичним для розбірливості мови, оскільки до слухача з усіх боків надходять відбиті сигнали зі схожою спектральною структурою і великим вмістом низькочастотних складових. Особливо це помітно в тій частині приміщення, де відстань більша критичного градуса лункості. Отже, істотну роль у підвищенні розбірливості відіграє відношення прямого звуку до відбитого по всій площі слухацьких місць; чим вище рівень прямого звуку тим вище відсоток розбірливості.

Як було показано В. Кнудсенom, відсоток артикуляції в приміщенні залежить від ряду факторів:

$$A\% = 96 * K_L * K_T * K_{Ш} * K_{\Phi}$$

Де K – коефіцієнти, які описують змінення відсотка артикуляції в залежності від: рівня гучності L , часу реверберації T , рівня шумів, що заважають, Φ , форми і розмірів приміщення Φ .

Оптимальні значення часу реверберації для деяких мовних приміщень невеликого об'єму (до 500м³) (площа основного залу як раз менша за 500) :

- Дикторська студія – 0.4с;
- Студія літературно-драматичного блоку – 0,5-0.6с;
- Для передачі художньої мови (збільшений динамічний діапазон) – 0,7-0,8с;
- Лунка студія – не менше 3 с;
- Заглушена студія – 0,2-0,25 с;
- Домашній кінотеатр – 0.285-0.315.

Більш складним є питання оптимізації акустичних умов в приміщенні для звучання музики. Акустичний стан музичного приміщення можна порівняти з якістю інструмента. Тому при оцінці музичного приміщення на перший план висувають естетичні вимоги. Зауважимо, що вирішальною в оцінці якості звучання різних залів є суб'єктивна експертиза, виконана фахівцями, на основі якої виконують остаточне акустичне настроювання залів.

Для вдалого акустичного проектування залів необхідне встановлення зв'язку між об'єктивно вимірюваними параметрами звукового поля в приміщеннях і суб'єктивною оцінкою якості їх звучання. З цих питань у літературі опубліковані численні, іноді суперечливі результати. Найбільш наближені до практичного використання критерії, запропоновані Баранеком. Йому належить одна з перших спроб встановити словник критеріїв суб'єктивної оцінки акустики музичних залів. На основі бесід з диригентами, музикантами, слухачами він вибрав 18 найбільш уживаних суб'єктивних критеріїв, а з них 10 найбільш значущих і незалежних.

До найбільш розповсюджених суб'єктивних критеріїв оцінки приміщень відносяться% лункість або життєвість% повнота звуку; чіткість і ясність% інтимність; теплота; яскравість; просторовість; гучність; баланс; ансамбль; тембр, а також негативні фактори: луна та луна, що пурхає і завади (шуми)

Життєвість. Найбільший вплив на відчуття життєвості звуків справляє значення часу реверберації на середніх частотах. У приміщеннях, у тому числі у студіях, де час реверберації занадто короткий для даного музичного жанру, звук характеризується як мертвий або сухий. Навпаки, якщо час реверберації занадто великий для даної музики, звук характеризується як брудний.

Повнота тону. Повнота тону або звучність залежить від відношення енергії ревербераційного звуку до енергії звукового сигналу, що надходить до слухача впродовж перших 80 мс (енергії прямого сигналу і ранніх відбиттів).

Детальніше про обчислення цього співвідношення буде викладено далі в рамках розгляду геометричної теорії. Звернемо увагу, що чим більше це відношення, тим вище повнота тону. Так, для церков це відношення велике і звук сприймається як повнозвучний. У приміщеннях, де енергія відбитих звуків мала, звук буде здаватися порожнім. У залах стародавніх оперних театрів, де звук від виконавця має можливість вільно підніматися і відбиватися від високих стель, енергія ревербераційних звуків буде великою, і звучання сприймається досить повним. Для забезпечення цієї якості звуку велике значення має форма залу і розміщення спеціальних панелей, що відбивають звук.

Чуткість і ясність. Під цими термінами розуміють ступінь, з яким окремі звуки в музичному творі чітко розділяються один від одного. Існує два види ясності: горизонтальна і вертикальна.

Горизонтальна ясність відноситься до звуків, що сліднують один за одним. Для цього композитор використовує спеціальні прийоми: темп, повторення тонів у фразі, відносну гучність послідовних тонів. Виконавець також може впливати на горизонтальну ясність манерою виконання.

Акустичні фактори в приміщенні, що визначають горизонтальну ясність музичного твору – це відношення енергії ранніх звуків до енергії ревербераційного звуку, тобто фактор обернено-пропорційний повноті звучання. Вертикальна ясність – це ступінь, з яким звуки, що звучать одночасно, розрізняють на слух. Вона залежить від стилю твору, мистецтва виконавця, акустики залу і тренуваності слуху. Композитор впливає вибором тонів, що звучать одночасно, вибором інструментів.

Акустичні фактори для вертикального розрізнення – баланс звуків різних інструментів, який істотно залежить від акустичних параметрів сценічного простору, і також відношення енергії ранніх звуків до енергії ревербераційного звуку.

Таким чином, горизонтальна і вертикальна ясність (чіткість) залежить як від музичних, так і від акустичних факторів.

Інтимність. Критерій інтимність або присутність, камерність, близькість визначають для слухача уявний розмір простору, в якому прослуховується музика. Різні стилі музики вимагають різних значень акустичної інтимності. Інтимність визначається різницею в часі між прямим і першим відбитим звуками, а також, частково загальною гучністю звучання, оскільки слухач припускає, що звук у маленькому приміщенні здається голосніше ніж у великому. Основний внесок у відчуття інтимності вносять перші відбиття від бокових стін (у залах з високими стелями) або від стель при порівняно низькій їх висоті. Велика різниця в часі приходу прямого звуку і першого відбиття створює у слухача відчуття віддаленості від музики, що виконується.

Просторовість. Цей критерій характеризує відчуття слухача, що музика йде від повної ширини залу, і звук оточує його з усіх боків.

Одна із складових сприйняття просторовості – удаване розширення площі джерела звуку. Вона пов'язана з рівнем бічних ранніх відбиттів, а також з рівнем гучності на низьких частотах (125-200 Гц).

Друга складова – ефект обгортання, коли слухач відчуває себе зануреним у звук з усіх боків. Це відчуття створюється впливом пізнього ревербераційного звуку, і залежить від конструкції залу: наявності нерегулярності стін, балконів та інших конструктивних елементів, що забезпечують дифузійність поля.

Так, відчуття звучання музики у слухача, до якого відбиті звуки надходять з усіх боків, будуть істотно відрізнятися від відчуття слухача, що сидить під балконом, і до якого звук надходить тільки з фронту.

Гучність. Використовується для оцінки залів як спеціальне суб'єктивне поняття, що характеризує гучність джерела звуку при грі фортіссімо відносно деякої очікуваної гучності на місці прослуховування.

Найбільш сприятлива відстань для прослуховування прямого звуку за цим параметром становить: від оркестру – 18м, від солістів – 6-15 м.

Теплота – відношення часу реверберації на низьких частотах до часу реверберації на середніх. Вимірюється при заповненому залі. Для музичних приміщень час реверберації на низьких частотах (125 Гц) повинен бути не менший, а можливо і на 20% відсотків більший ніж на середніх (500-1000 гц) частотах. Теплота суб'єктивно визначається як звучність басів у порівнянні зі звучністю середніх частот.

Яскравість – визначається присутністю у звучанні високих частот. Залежність від відношення часу реверберації на високих частотах (2000 – 4000 Гц) до часу реверберації на середніх частотах.

З урахуванням значного затухання високочастотних компонентів звуку у приміщенні час реверберації на високих частотах повинен бути не менший і, навіть, на 20% більший, ніж на середніх частотах.

Баланс. Поняття балансу служить для оцінки гучності окремих інструментів і груп інструментів відносно загальної гучності оркестру. Баланс повинен бути як між різними групами інструментів, так і між оркестром і солістами. Баланс залежить від особливостей простору, що оточує сцену, розміщення оркестрантів, від майстерності диригента і звукорежисера.

Ансамбль, Поняття, що включає стрункість, злагодженість спільного виконання, у тому числі ритмічну точність і синхронність виконання окремих партій.

Почуття ансамблю залежить від чутності власного виконання і взаємної чутності, що визначається в значній мірі конструкцією сцени і поверхонь поблизу неї.

Тембр. Складне поняття, по суті – якість звук, яка дозволяє відрізнити звук одного інструменту або голосу від іншого. Кожний інструмент має свій характерний тембр звучання, своє забарвлення звуку.

Тембр залежить від структури звуку в усі періоди його звучання: у момент атаки, у стаціонарний період і в момент спаду.

Отже, ми розглянули основні критерії, за якими оцінюється акустична якість музичних приміщень. З урахуванням всіх цих факторів і складається мистецтво створення залів з гарною акустикою.

Варто підмітити що оптимальний час реверберації для музичних залів звичайно більший, ніж для мовних приміщень. Якщо для мови, в залежності від художніх вимов, оптимальний час реверберації змінюється в межах від 0,4 до 1 с, то для камерної музики – від 1 до 1,5 с, а для симфонічної, в середньому від 1,8 до 2,2, але для електронної музики ми знов повертаємося до 0,6-1с (що підпадає під діапазон мовних приміщень).

1.3 Вплив форми залів на утворене звукове поле

Звукове поле, що утворюється в приміщенні, напряму залежить від форми приміщення, кількості людей та декорацій.

Дослідження впливу звукового поля на чутність показують, що особливу роль відіграє його дифузність, яка характеризує ступінь однорідності звукового поля.

Основними формотворними частинами залу є стіни і стеля, також значно на якість поширення звукових хвиль низької частоти впливають балкони, колони, пілястри, великі ліпні прикраси, люстри, розташовані в просторі залу, які створюють дифузні звукові поля. Дифузне розсіювання звукової хвилі можна досягти тільки параметрами поверхні, у якій вертикальний і горизонтальний розмір дорівнює або перевищує довжину звукової хвилі у два метри.

Для формування дифузного звукового поля в приміщеннях залів варто дотримуватися таких пропорцій:

- довжина залу не повинна перевищувати його ширину більш ніж удвічі;
- ширина може бути більше висоти максимально в два рази;
- уникати поверхонь великої протяжності, розташованих паралельно (вони утворюють дуже неприємний для слуху ефект «пурхаюча луна»)

Явище «Луни» Відбите повторення звукового сигналу досягає слухача, коли відчуття звуку прямої передачі вже пройшло, тобто коли між двома сприйняттями звуку утворилася пауза. Величина інтервалу, що викликає появу луни, залежить від довжини імпульсу. Так, наприклад луна від коротких ударних імпульсів утворюється вже при незначному перевищенні критичного інтервалу часу. Коли луна повторює цілий склад, то потрібний інтервал біля 100 мс. В цьому разі при швидкості мови 5 складів/с, луна надходить між двома складами і викликає у слухача враження, що мова весь час переривається.

Для безпеки утворення луни слід обирати найменшу величину $1/18$ с, коли луна зливається з основним звуком і не розрізняється на слух.

Звучна луна. Коли до слухача надходить декілька луна-сигналів, розділених дуже коротким проміжком часу, таким що вони вже не сприймаються слухом як окремі звуки, то утворюється так звана звучна луна, причому довжина хвилі основного тону відповідає відстані між двома луна-сигналами. Таке явище неодноразово спостерігалось у залах, в яких ряди крісел розташовані концентрично із сильним підйомом від естради. Незаповнені ряди крісел відбивають звук зворотно до джерела.

Луна, що пурхає. Проста луна, про яку йшла мова, відбивається по одному разу від однієї або декількох поверхонь. Пурхаючи, або багаторазово відбита луна, утворюється коли звукові хвилі багаторазово відбиваються двома або декількома поверхнями, повертаючись повторно у вихідний пункт.

Звичайна умова виникнення багаторазово відбитої луни утворюється, коли в закритому приміщенні поверхні двох паралельних стін відбивають, а поверхні решти стін поглинають звук. Тоді звукові хвилі, що падають на поглинаючі стіни, швидко затухають, а між іншими стінами звук повторно відбивається і кожний раз, проходячи повз слухача, викликає луну.

Аналіз форми і розмірів залів, та інших поверхонь з акустичної точки зору проходить за даними досліджень з натури або на моделі, наприклад у спеціалізованому П.О, (ease) .Також на основі геометричних побудов. Застосовність геометричних віддзеркалень залежить від довжини звукової хвилі, розмірів відзеркалювальної поверхні та її розташування, але по відношенню до джерела звуку і глядачів.

Коли ж променева площина паралельна одній з площин проекцій, кути падіння і віддзеркалення проектується на цю площину проекцій без спотворення. Якщо ж променева площина не паралельна площині проекцій, але їй паралельна нормаль в точці віддзеркалення, то проекції кутів падіння і віддзеркалення залишаються рівними; побудова відбитого променя виконується в цьому випадку звичайними прийомами нарисної геометрії. Якщо найменша сторона відбивача не менше, ніж в 1,5 рази перевищує довжину хвилі, віддзеркалення звукових хвиль буде направленим. При рівності довжин хвиль і розмірів відбивача і подальшому збільшенні довжин хвиль звукова енергія при віддзеркаленні розсівається і побудова відбитих звукових променів втрачає сенс.

При різниці в часі приходу прямого і відбитого звуків більше 0,05с людина вже розрізняє ці звуки. Це явище називається луною. За 0,05с звук проходить відстань 17 м ($340 \times 0,05 = 17$ м). Тому виникнення луни можливе тільки в приміщеннях достатньо великого розміру, проте своєрідне 'пурхаюча луна' може виникнути і в малих залах за рахунок багатократних віддзеркалень від протилежних стін з малим звукопоглинанням. Для попередження

‘пурхаючої луни’ необхідно збільшити звукопоглинання цих стін, або принаймні одній з них, тобто знизити інтенсивність віддзеркалення звукових хвиль, або відмовитися від такої форми залу. Увігнуті або склепінчасті поверхні з малим звукопоглинанням сприяють концентрації звукової енергії, фокусують звук. Якщо джерело звуку розташовується в центрі кривизни, віддзеркалення концентруються в центрі круга. При наближенні джерела звуку до поверхні (до половини радіусу) кругова поверхня відбиває як еліптична, тобто фокус знаходиться за центром круга. При подальшому наближенні джерела звуку до віддзеркалюваної поверхні величина фокусної відстані зростає, досягаючи нескінченності, тоді відстань до джерела звуку стає рівною половині радіусу. В цьому випадку дана поверхня відбиває як параболічна. Якщо джерело звуку розташоване ще ближче, то фокус утворюється позаду віддзеркалюваної поверхні і поверхня діє як гіперболічна. На рис. 1.1 показані схеми залів при різному співвідношенні радіусу кривизни циліндрової стелі і висоти. При однаковій віддзеркалюваній поверхні стелі площа підлоги, охоплена відбитими променями, неоднакова. Найбільша концентрація звуку, коли радіус кривизни близький до висоти приміщення. Тому радіус кривизни повинен бути значно більшим або меншим висоти приміщення. В цьому випадку зони концентрації звуку будуть розташовані далеко від поверхні підлоги, на якій розташовуються глядачі [1,4]. Якщо радіус кривизни менше довжини хвилі на низьких частотах, то концентрація звуку відбуватиметься на середніх і високих частотах, що призведе до спотворення тембру звуку.

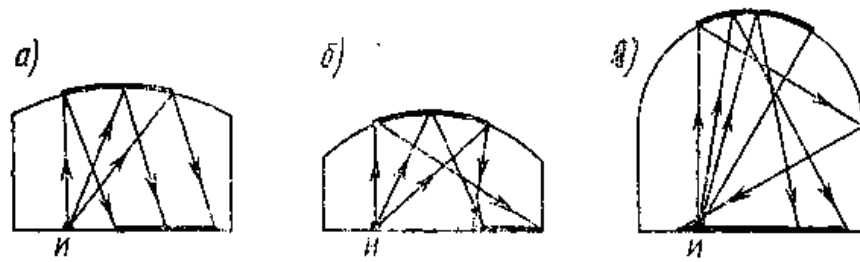


Рис. 1.1. Вплив радіусу кривизни r
на характер віддзеркалення при різній висоті:
а — при $h = \frac{1}{2}r$; б — при $h = r$; в — при $h = 2r$

РОЗДІЛ 2. Звукоізоляція в приміщеннях

Під терміном «звукоізоляція» розуміють захист приміщень від проникнення в них звукових завад або шумів, джерела яких можуть знаходитися як зовні споруди, так і всередині її.

Звукоізоляція - зниження рівня звукового тиску при проходженні хвилі крізь перешкоду. Ефективність захисної конструкції оцінюють індексом ізоляції повітряного шуму R_w (усередненим в діапазоні найбільш характерних для житла частот - від 100 до 3000 Гц), а перекриття - індексом приведенного ударного шуму під перекриттям L_{nw} . Чим більше і менше L_{nw} , тим краще звукоізоляція. Обидві величини вимірюються в дБ.

Звукопоглинання - зниження енергії відбитої звукової хвилі при взаємодії з перешкодою, наприклад зі стіною, перегородкою, підлогою, стелею. Здійснюється шляхом розсіювання енергії, її переходу в тепло, збудження вібрацій. Звукопоглинання оцінюють за середнім показником в діапазоні частот 250-4000 Гц і позначають за допомогою коефіцієнта звукопоглинання α_w . Цей коефіцієнт може приймати значення від 0 до 1 (чим ближче до 1, тим відповідно вище звукопоглинання). Щоб знайти способи захисту приміщень від шумів, слід встановити характер цих шумів і шляхи їх проникнення через перегородки.

Шум - безладні коливання різної фізичної природи, що відрізняються складністю тимчасової і спектральної структури. У побуті під шумом розуміють різного роду небажані акустичні перешкоди при сприйнятті мови, музики, а також будь-які звуки, що заважають відпочинку, роботі.

Технології звукоізоляції:

- Поглинання – перетворення звукової хвилі до іншої форми енергії (теплова) за допомогою ізоляційних панелей/подушок

- Блокування – створення бар’єру для зупинки повітряних коливань, зменшення проходження повітряного шуму
- Переломність – зниження рівня звукової енергії за допомогою проходження через різномірні структури стіни
- Ізоляція – повне обмеження шуму захисним шаром у сфері поширення шуму

2.1 Види шумів і звукоізоляційні норми.

Шуми за характером їх виникнення розділяють на основні групи:

- Тривалий шум з широким спектром частот: вуличний шум, шум із сусудніх концертних залів або музичних студій;
- Тривалий шум з частотним спектром, не змінюється, джерелом якого можуть бути працюючі електромотори, станки, падаюча вода і т.д.;
- Короткочасний шум, який передається повітрям у вигляді шуму мотору літаків, пароплавних гудків і гудків електровозу, шуму пилорами тощо;
- Тривалі і короткочасні шуми, викликані зовнішніми механічними струсами елементів будівель, наприклад, від потягу, що проходить поряд, або внутрішніми від працюючих машин і механізмів.

Відповідно до джерел, шум всередині будівлі можна розділити на кілька категорій:

1. повітряний шум;
2. ударний шум;
3. структурний шум (звуки від будівельних систем, системи вентиляції, опалення і т.п.);

Повітряний шум виникає при випромінюванні звуку (людського голосу, музичних інструментів, машин, обладнання та ін.) в повітряний простір, який досягає будь-якої огорожі і викликає її коливання. Коливання огорожі, в свою

чергу, випромінює звук в суміжне приміщення, і таким чином повітряний шум досягає сприймаючу його людину.

Фактична ізоляція повітряного шуму залежить не тільки від звукоізоляційних властивостей конструкції огорожі, а й від площі цієї конструкції, а також від звукопоглинання поверхні стін, підлоги, стелі і предметів в тихому приміщенні. Оскільки показники в кожному конкретному випадку змінюються, введено поняття звукоізолюючої здатності (власної звукоізоляції) R_n , яка вимірюється в децибелах. Ця величина не залежить ні від площі, ні від звукопоглинання, вона властива тільки самій огорожувальній конструкції.

Для зручності вимірювань користуються індексом ізоляції повітряного шуму. Він дозволяє виводити усереднені величини. Так в нормативах для міжквартирних стін і міжповерхового перекриття встановлені мінімальні значення R_n , які рівні:

- 54 дБ для будинків категорії А (високо комфортні умови);
- 52 дБ для будинків категорії Б (комфортні умови);
- 50 дБ для будинків категорії В (гранично-допустимі умови).

Ударний шум утворюється при падінні на підлогу предметів, ходьбі людини, пересуванню меблів та інші. Виникаючі при цьому коливання перекриття передаються на повітряний обсяг нижнього приміщення, а також всієї будівлі в цілому.

Ізоляція ударного шуму визначається за допомогою «тупальної» машини, яка встановлюється на підлозі верхнього приміщення, обчислюючи рівні звукового тиску L_n , дБ під перекриттям. При цьому, чим вище значення L_n , тим гірше ізоляція перекриттям ударного шуму. Усереднені значення L_n дозволяють визначити індекс ударного шуму під перекриттям, які дорівнюють:

- 55 дБ для будинків категорії А;

- 58 дБ для будинків категорії Б;
- 60 дБ для будинків категорії В.

Структурний шум виникає при контакті будівельних конструкцій з різним вібруючим обладнанням. Структурний шум поширюється по будівельним конструкціям і випромінюється в приміщення на всіх шляхах свого поширення.

Шляхи передачі шуму в ізолююче приміщення можуть бути прямими і непрямыми. Така передача можлива тому, що коливання, викликані повітряним або ударним шумом, розповсюджуються по конструкціях всієї будівлі.

При розповсюдженні шуму по будівлі непрямыми шляхами відбувається зменшення його інтенсивності в наслідок поглинання енергії коливань матеріалами конструкцій, втрати енергії в стиках і розподілу енергії на площу конструкцій. В сучасних будівлях за рахунок зниження маси конструкцій, збільшення жорсткості на стиках і зменшення їх числа спостерігається інтенсивніша передача шуму по непрямим шляхах. У результаті шум розповсюджується з малим загасанням на великі відстані від джерела, призводячи до дискомфортних умов у ряді приміщень, що характерний для багатьох сучасних будівель, що виконуються з великорозмірних конструкцій.

2.2. Ізоляція повітряного шуму спеціальними конструкціями

Будь-яке приміщення обмежене стінами, які представляють собою перешкоди для звукових хвиль. Ці конструкції бувають двох типів: одношарові, частіше монолітні (цегляні, залізобетонні, кам'яні та інші), і багатошарові, що складаються з листів різних матеріалів. Підвищити звукоізоляцію огорож можна наступними способами:

- зробити так, щоб звукова хвиля не змогла змусити перешкоду коливатися, передаючи при цьому звук всередину приміщення;

- домогтися поглинання і розсіювання енергії звукової хвилі усередині конструкції.

2.2.1. Звукоізоляція одношаровими конструкціями

Під одношаровими конструкціями маються на увазі конструкції, що складаються з одного або декількох шарів, жорстко зв'язаних один з одним.

Цей шлях вимагає, щоб перешкода важкою чи жорсткою. Чим важче і ширше моноліт і вища частота звуку, тим менше пропускна здатність стіни. Але зв'язок не є прямим. Наприклад оштукатурена стіна в пів цеглини має звукоізоляцію в 47 дБ, така ж стіна, але в цеглину дає звукоізоляцію більше всього на 6-7 дБ. Тобто подвоєння маси навіть близько не дає подвоєння звукоізоляційних характеристик.

В таблиці 1.1 приведена залежність між значеннями коефіцієнтів звукопередачі τ і R .

За визначенням енергія, що пройшла через конструкцію, до енергії, падаючої на неї, називається коефіцієнтом звукопередачі τ . Ізоляція повітряного шуму конструкцією без урахування непрямої передачі при дифузному падінні звуку, дБ, рівна:

$$R = 10 \lg \frac{1}{\tau}, \quad (2.1)$$

Таблиця 1.1

Енергія, що пройшла через конструкцію, %	Коефіцієнт звукопровідності, τ	Власна звукоізоляція, σ , дБ	Тип перегородки
10	10^{-1}	10	-----
1	10^{-2}	20	Двері
10^{-1}	10^{-3}	30	Вікна
10^{-2}	10^{-4}	40	Міжкімнатна перегородка
10^{-3}	10^{-5}	50	Міжквартирна перегородка

Якщо, наприклад, через конструкцію пройшло 10% всієї енергії, то тоді $\tau = 10/100 = 0,1$ і $R = 10 \lg(10) = 10$ дБ. Як видно, для забезпечення достатньо високої ізоляції повітряного шуму допустиме проходження через дану конструкцію не повинно перевищувати одну стотисячну частину падаючої звукової енергії. Тому таке велике значення якості будівельних робіт. Тільки при забезпеченні хорошої герметичності конструкцій, за відсутності тріщин і щілин можна досягти необхідної ізоляції повітряного шуму.

Кількість звукової енергії, переданої через конструкцію, прямо пропорційна її площі:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A_2}, \quad (2.2)$$

де L_1 і L_2 — відповідно рівні звукового тиску в приміщенні з джерелом шуму і в ізольованому приміщенні. Основний вплив на передачу звуку роблять згинні хвилі. Вони утворюються, якщо товщина конструкцій менша $\frac{1}{6}$ довжини хвилі згину на даній частоті. Звукоізолюючі конструкції задовольняють цій умові у всьому нормованому діапазоні частот. У цьому діапазоні довжина згинних хвиль менша лінійних розмірів конструкцій, тому як модель одношарової конструкції може служити тонка пластина нескінченної довжини. Звукові хвилі падаючи на конструкцію приводять її в коливальний рух. На низьких частотах поблизу частот власних коливань конструкції виникають резонансні явища і звукоізоляція багато в чому залежить від внутрішнього тертя в матеріалі. Для будівельних конструкцій цей діапазон не характерний, оскільки він лежить нижче частоти 100 Гц.

2.2.2. Звукоізоляція конструкціями з отворами

Визначення загального рівня звукового тиску в приміщенні. Вікна і двері із-за невеликої маси і малої герметичності завжди мають гіршу звукоізоляцію, ніж захисні конструкції. За наявності отворів, щілин звукоізоляція захисних конструкцій знижується. Це зниження визначається в основному відношенням розмірів отворів до довжини падаючої звукової хвилі. Якщо це відношення близьке до 1, то звукова енергія, що пройшла через отвір, пропорційна площі отвору. Загальну звукоізоляцію конструкції при наявності подібних отворів або відкритих отворів визначають за формулою (дБ):

$$R_{\text{заг}} = R_1 - 10 \lg \frac{1 + S_1 / S_2 (10^{R_1/10})}{1 + S_1 / S_2}, \quad (2.8)$$

За наявності декількох джерел шуму, розташованих за різними захисними конструкціями можна визначити загальний рівень звукового тиску в даному приміщенні. Цей рівень рівний:

$$L = 10 \lg \sum_{i=1}^n S_i \cdot 10^{\frac{L_i - R_i}{10}} - 10 \lg A, \quad (2.9)$$

де S_i – площі захисних конструкцій, м^2 ;

L_i – рівні звукового тиску в приміщеннях за конструкціями, що розглядаються, дБ;

R_i – звукоізоляція конструкціями, дБ;

A – еквівалентна площа звукопоглинання в приміщенні, м^2 .

Для практичних цілей буває достатньо визначення не частотної характеристики рівнів звукового тиску, а середніх значень L .

Із формули (2.9) випливає, що зменшення шуму в приміщенні може бути отримано за рахунок підвищення ізоляції конструкцій, зменшення площі огорожі, інших більш шумних приміщень, підвищення рівня звукопоглинання в ізолюючому приміщенні.

РОЗДІЛ 3. Акустичний проект

Приміщення знаходиться на старій ткацькій фабриці. На даний час там знаходиться приблизно 4 клубів (один з них входить в топ 20 кращих у Європі), які також працюють як майданчики для концертів або лекцій, 1 фото студія і приміщення онлайн радіо «20ft Radio» яке у 2017 році проголосили кращім музичним інтернет проектом по версії WebbyAwards.

В цій роботі розбирається клуб «Otel'», який працює у якості нічного клубу, місця для проведення концертів, лекцій, уроків по повітряній гімнастиці та як кінознімальний майданчик.

Основна мета даної роботи – об'єктивна оцінка акустичних характеристик основних танцполів і вироблення, при необхідності, рекомендацій по оптимізації.

Робота включає:

- натурні вимірювання необхідних акустичних параметрів в основному залі клубу;
- обробку результатів вимірювань і оцінку отриманих характеристик на відповідність оптимальним вимогам;
- розробку попередніх рекомендацій по оптимізації акустичних характеристик і їх погодження директорами клубу.

3.1. Загальні відомості

Територія клубу включає в себе 3 різні зони та подвір'я:

1. Основний зал – функціонує як танцювальний майданчик, місто для кінопоказів, лекцій, інше;
2. Підвальне приміщення – функціонує як зона для відпочинку, бар, другий танцювальний майданчик, або зона для музикантів, організаторів, інше;
3. Верхній зал - функціонує як бар та зона для відпочинку;
4. Подвір'я – зона для відпочинку чи проведення ккінопоказів.

В Додатку прикладені зображення змодельованого клубу у програмному забезпеченні Sketch Up Pro 2019. Розміри, на яких базується модель були заміряні за допомогою акустичного дальноміра.

Основний зал:

Параметри приміщення :

- Довжина – 7.3 м;
- Ширина – 9.3 м;
- Висота – 5.11 м;
- Об'єм – 358.2 м³.

Співвідношення основних розмірів (довжина / ширина; ширина / висота) становлять не більше 2, що свідчать про те, що пропорції залу, в цілому, являються оптимальними.

Стіни з цегли без розшивки, підлога – залізобетонна поверхня, стеля складається з 3 різних матеріалів – залізна сітка, мінеральна вата та шар шиферу. На фронтальній стіні знаходяться 3 портали: шириною 1720 см, 1720 см, 1670 см, висотою 2770 см та глибиною 800 см. На протилежній стінці знаходиться дверний отвір до залу шириною 1860 см і висотою 2500 см.

На перпендикулярній стінці є два отвори, перший є проходом на зал вище, другий смотровою з зонною: 1. Шириною 136 см, висотою 220 см, 2. Шириною 150 см і висотою 200 см. Стінки вирізів зроблені з залізних пластин.

У залі знаходиться діджейській стіл з сабвуферами та апаратурою.

Сабвуфери типу 1 – довжина 152 см, ширина 78 см, висота 45 см.

Сабвуфери типу 2 – довжина 123 см, ширина 83 см, висота 58 см.

Стіл для музикантів – верхня дошка в довжину 234 см, ширина 82 см, висота 5 см. Поверх неї лежить шар ткани.

Також в залі знаходяться акустичні пастки з мінвати шириною 10 см.:

- шестикутники зі сторонами 51 см та 100 см шестикутник зі сторонами 150 см
- 3 прямокутні в порталах в стінах.

Підвальне приміщення:

Параметри приміщення :

- Довжина – 7.2 м;
- Ширина – 9.19 м;
- Висота – 3.2 м;
- Об'єм – 211.7 м³.

Співвідношення основних розмірів (довжина / ширина; ширина / висота) становлять не більше 2, що свідчать про те, що пропорції залу, в цілому, являються оптимальними.

2 стіні з цегли без розшивки та 2 з плиткою, підлога – залізобетонна поверхня. Присутні 4 колони і колони під стелею. Між колонами висить 4 мати з мінеральної вати. Натягнутий екран для проєкції габаритами 2.5 на 4.2 м.

Бар зроблений з цегляної стінки (312x140 см та 174x140 см).

За полотном знаходиться маленьке технічне приміщення для інструментів.

Верхній зал:

Параметри приміщення :

- Довжина – 9.4 м;
- Ширина – 7.4 м;
- Висота – 4.9 м;
- Об'єм – 340,84 м³.

Три стіни зроблені з цегли, одна з гіпсокартону. Підлога та стеля – залізобетон. Під час оренди приміщення в зал вносять барні стійки.

Задній двір:

Повністю відкрита зона на вулиці. Тут не проводилось ні яких замірів по причині того що директор клубу сказав що вони почнуть роботу над ним у літку, а доки не знають що там буде.

3.2. Методика проведення акустичних вимірювань

Натурні вимірювання необхідних акустичних параметрів в глядацькому залі театру проводились у відповідності з вимогами чинних стандартів і норм.

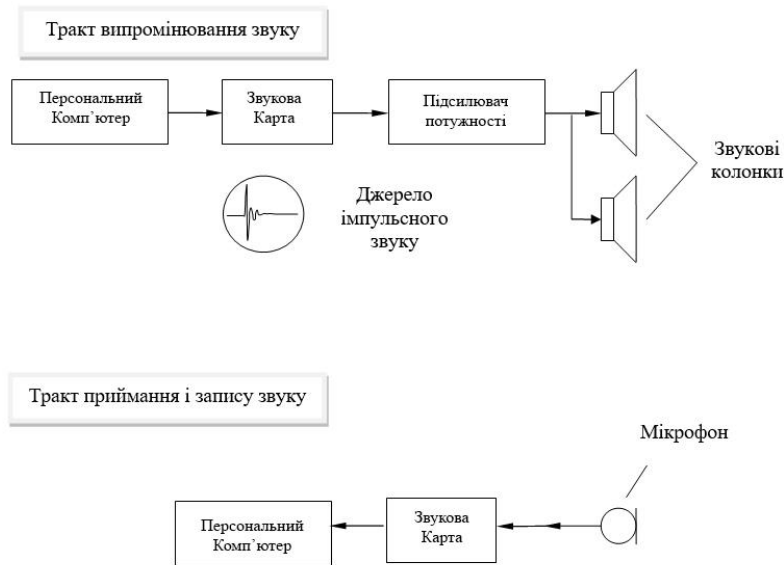
Блок-схема установки для проведення акустичних вимірювань наведена на рис. 3.1. Установка включала системи передачі та приймання звукових сигналів.

Звуковий сигнал «білого» шуму моделювався за допомогою програми «Matlab» та піддавався цифровій фільтрації 1/1 октавними фільтрами. Сформований смуговий сигнал через звукову карту подавався на підсилювач потужності і випромінювався в приміщення системою звукових колонок.

Джерелом імпульсного звуку слугував вибух кульки.

Система для приймання звуку включала:

- вимірювальні мікрофони;
- звукову карту;
- персональний комп'ютер.



Апаратура, що використовувалась, відповідає вимогам стандартів на проведення акустичних вимірювань і має діючі свідоцтва про державну перевірку згідно з ГОСТ 8.002-71, проведену ДП «Укрметртестстандарт».

Рисунок 3.1 – Блок-схема вимірювальної апаратури

Точки, в яких проводились вимірювання акустичних параметрів залу, показані на рис. 3.2



Рис 3.2. – Зал, в якому проводились вимірювання акустичних параметрів

3.3. Результати натурних вимірювань і оцінка акустичних характеристик залу театру

Рівень комфортності в залі в значній мірі визначається акустичними умовами, які можна оцінити за результатами вимірювань наступних об'єктивних параметрів:

- часу реверберації залу;
- структури відбиття звуку від огорожень залу;
- енергетичних показників, що характеризують чіткість і ясність звучання в залі;
- звукоізоляції залу.

3.3.1 Час реверберації

Для характеристики акустичних властивостей приміщень встановлено поняття стандартного часу реверберації, що є однією з важливих акустичних характеристик. Стандартний час реверберації – це час, протягом якого звукова енергія (E) в приміщенні зменшиться в мільйон разів порівняно з початковою енергією (E_0), тобто

$$\frac{E}{E_0} = 10^{-6}. \quad (3.1)$$

Окрім чисто геометричних параметрів приміщення – його об'єму V і сумарної площі огорожувальних поверхонь $S_{\text{іаіо}}$ - на час реверберації має вплив величина звукопоглинання окремих елементів огорожень, а також (для великих залів) температура і вологість повітря.

З урахуванням цих факторів стандартний час реверберації визначається за таким виразом:

$$T = \frac{0,163V}{-S_{\text{іаіо}} \ln(1 - \bar{\alpha}) + 4mV}, \quad (3.2)$$

де $\bar{\alpha}$ - середній коефіцієнт звукопоглинання в приміщенні;

m - коефіцієнт, що враховує поглинання звуку в повітрі при відповідній температурі і вологості.

Для початку підраховується оптимальний час реверберації приміщення. Для високоякісного сприйняття мовних і музичних програм необхідно, щоб вони мали достатній рівень гучності. Але, внаслідок обмеженої акустичної потужності природних джерел звуку, густину звукової енергії в приміщенні зі збільшенням його об'єму стає все менше, що погіршує умови прослуховування.

Використовуючи емпіричну форму, яка пов'язує оптимальний час реверберації з об'ємом приміщення:

$$T_{\text{опт}} = 0,09V^{\frac{1}{3}}$$

$$T_{\text{опт}} = 0.62 C$$

Використовуючи формулу С.Я. Ліфшеца

$$T_{\text{опт1}} = 0,41 \lg V$$

$$T_{\text{опт1}} = 1.05 C$$

Натурні вимірювання часу реверберації в залі театру проводилось відповідно з вимогами, викладеними в рекомендаціях [1] і в стандарті ГОСТ 24146 – 89 [2]. Як джерело звуку використовувалися звукові колонки з достатньою акустичною потужністю ($P_a \geq 25 \text{ Вт}$), що випромінювали «білий» шум у відповідних частотних смугах.

Точки вимірювання часу реверберації були вибрані з урахуванням симетричності залу. Місцезнаходження точок вимірювання показане вище. При цьому вимірювальний мікрофон встановлювався на висоті $1,7 \div 1,8 \text{ м}$ від підлоги.

Вимірювання часу реверберації проводились в октавних смугах частотного діапазону 63 – 8000 Гц. Дані про час реверберації нижче і вище

нормованого діапазону (125 – 4000 Гц) мають інформативне значення. При проведенні вимірювань в кожній точці створювався достатній рівень корисного сигналу для забезпечення відповідного співвідношення «корисний сигнал / шумова завада», рівного

$$L_{\text{псд}} - L_{\text{зад}} \geq 35 \text{ дБ}. \quad (3.3)$$

Умови проведення вимірювань:

- зал порожній (без присутності глядачів);
- температура повітря $\sim +18^\circ\text{C}$;

Результати вимірювань часу реверберації в залі театру наведені в таблиці 3.1. При заповненні залу відповідною кількістю гостей час реверберації зміниться, так як при цьому зміниться величина загального звукопоглинання в залі ($A_{\text{заг}}$, м^2), яка, в свою чергу, визначає середній коефіцієнт звукопоглинання

$$\tilde{\alpha} = \frac{A_{\text{заг}}}{S_{\text{огор}}}. \quad (3.4)$$

Розрахункові величини часу реверберації залу, заповненого на 70%, наведені в таблиці рисунку 3.3.1. З отриманих результатів видно, що в нормованому діапазоні частот 125 – 4000 Гц час реверберації становить:

- в діапазоні низьких частот (125 – 250 Гц) – $T_{\text{н.ч.}}=0,78-0,8\text{с}$;
- в діапазоні середніх частот (500 – 1000 Гц) – $T_{\text{с.ч.}}=0,62\text{с}$;
- в діапазоні високих частот (2000 – 4000 Гц) – $T_{\text{в.ч.}}=0,3-0,4\text{с}$.

Таблиця 3.1

Точка Вимірювання	Час реверберації (с) в октавних смугах з середньогометричними частотами, (Гц)							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	1.292	0.546	0.596	0.596	0.612	0.578	0.452	0.378
2	0.982	0.414	0.782	0.63	0.616	0.584	0.438	0.314
3	0.55	0.64	0.666	0.692	0.686	0.546	0.59	0.426
4	0.874	0.55	0.71	0.58	0.622	0.502	0.532	0.452
5	0.55	0.782	0.668	0.646	0.654	0.626	0.442	0.47
6	0.994	0.698	0.868	0.62	0.586	0.562	0.276	0.398
7	0.6	0.53	0.742	0.642	0.62	0.612	0.498	0.494
8	0.492	0.694	0.532	0.636	0.708	0.438	0.384	0.348

Отримані значення часу реверберації порівнюються з оптимальними значеннями $T_{\text{опт}}$, с, для залу відповідного об'єму і призначення.

В цілому частотна характеристика часу реверберації має бути близькою до рівномірної (частотнонезалежною), але для концертних залів бажаним є незначне збільшення значень часу реверберації на низьких частотах (до 20% на частоті 125 Гц) і таке ж зменшення значень часу реверберації в діапазоні високих частот (до 20% на частоті 4000 Гц).

З вимірювань видно що приміщення занадто переглушено.

3.3.2. Структура відбиття звуку в залі

Структура ранніх звукових відбиттів, що визнається їх рівнями і часом запізнення відбитого від огороження звуку по відношенню до прямого звуку, має значний вплив на якість сприйняття в залі як мовних, так і музичних програм. Ця характеристика, будучи локальною, тісно пов'язана з усіма

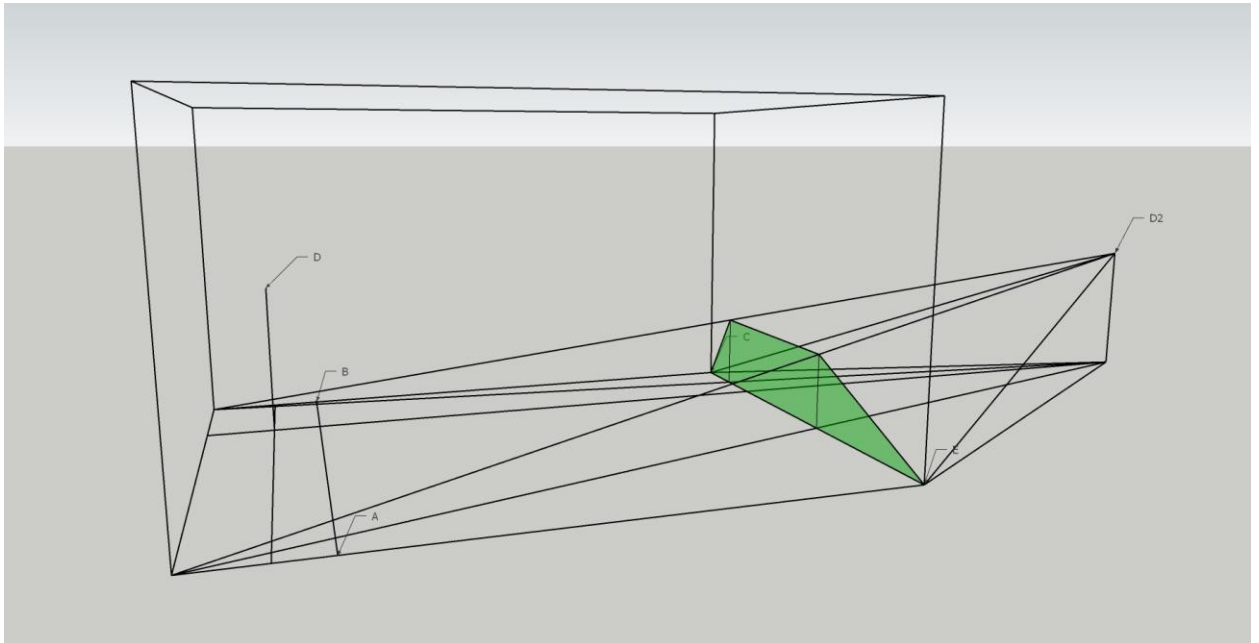
архітектурними параметрами приміщення: його розмірами, формою, обрисами і оздобленням внутрішніх поверхонь.

Експериментально встановлено, що для хорошої розбірливості інформації різниця в часі між приходом першого відбиття звуку від огороження і прямим звуком, повинна знаходитися в межах до $\Delta\tau = 0,03$ с. Для музичних програм ця величина може бути дещо збільшена (до $\Delta\tau = 0,04 - 0,05$ с). При швидкості розповсюдження звукової хвилі $c = 340$ м/с, різниця в ході відбитого і прямого звуку при цьому становитиме до 10 м (при $\Delta\tau = 0,03$ с). Бажано, щоб і послідовні запізнення приходу подальших звукових відбиттів також не перевищували рекомендованих значень.

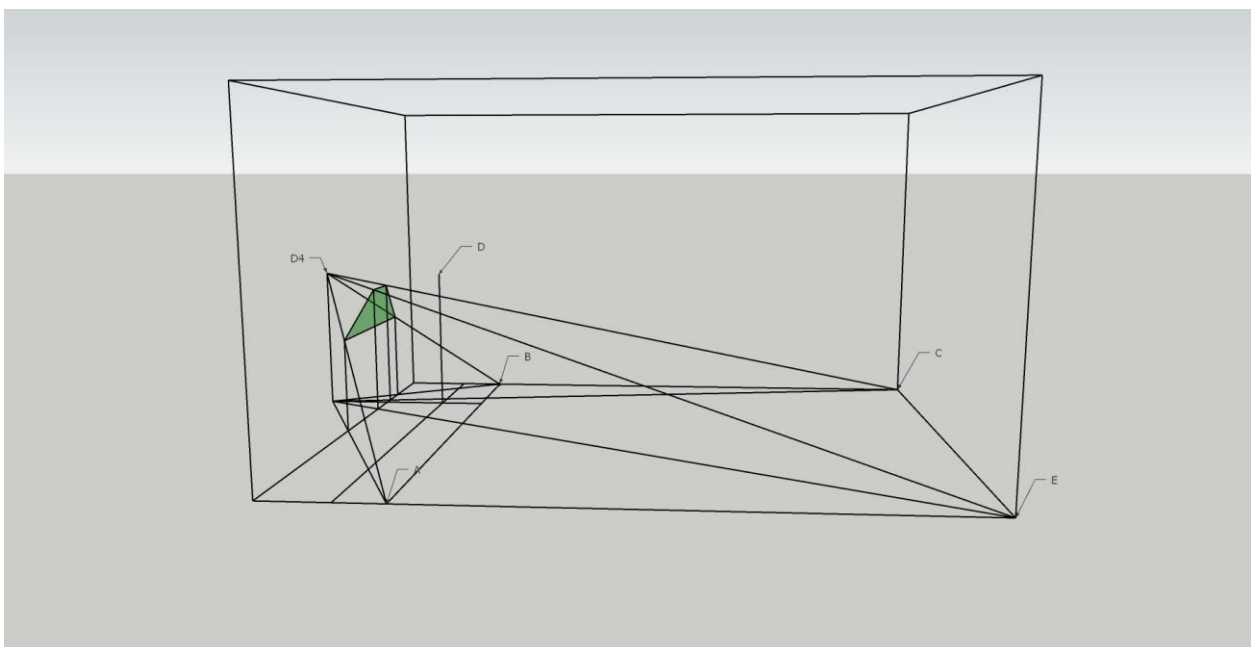
Площини відбиттів зроблені за методами геометричної акустики у програмному забезпеченні SketchUp Pro 2019.

Перші відбиття

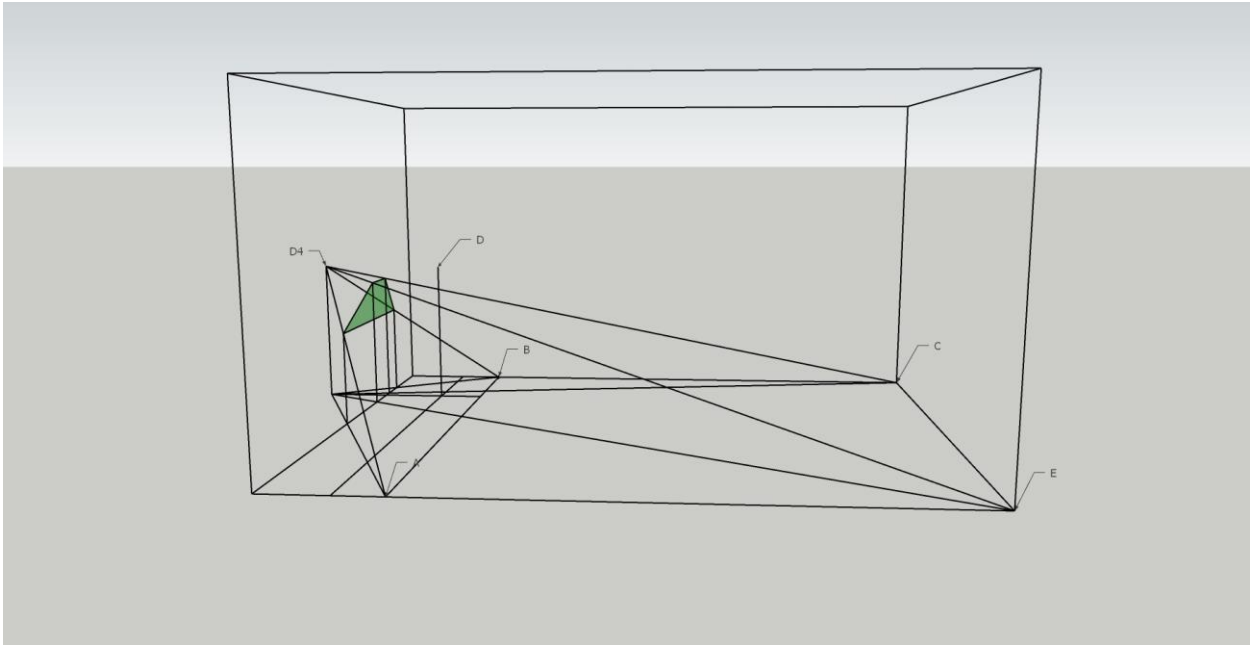
1. Відбиття від правої стінки



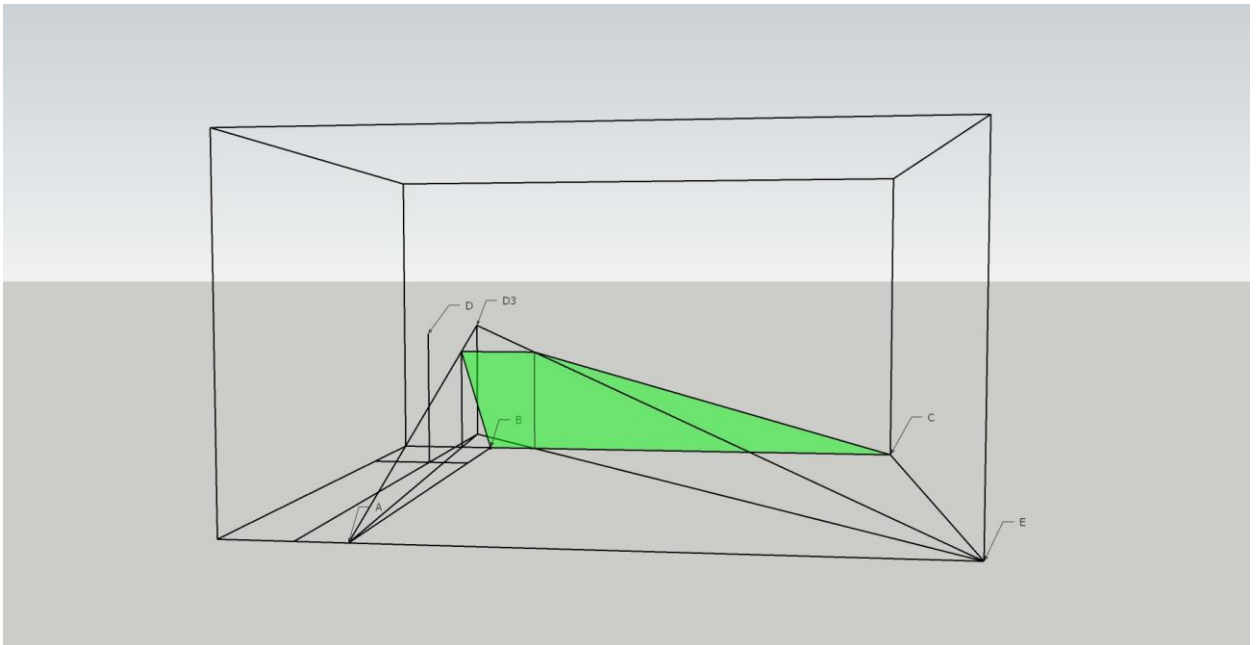
2. Відбиття від лівої стінки



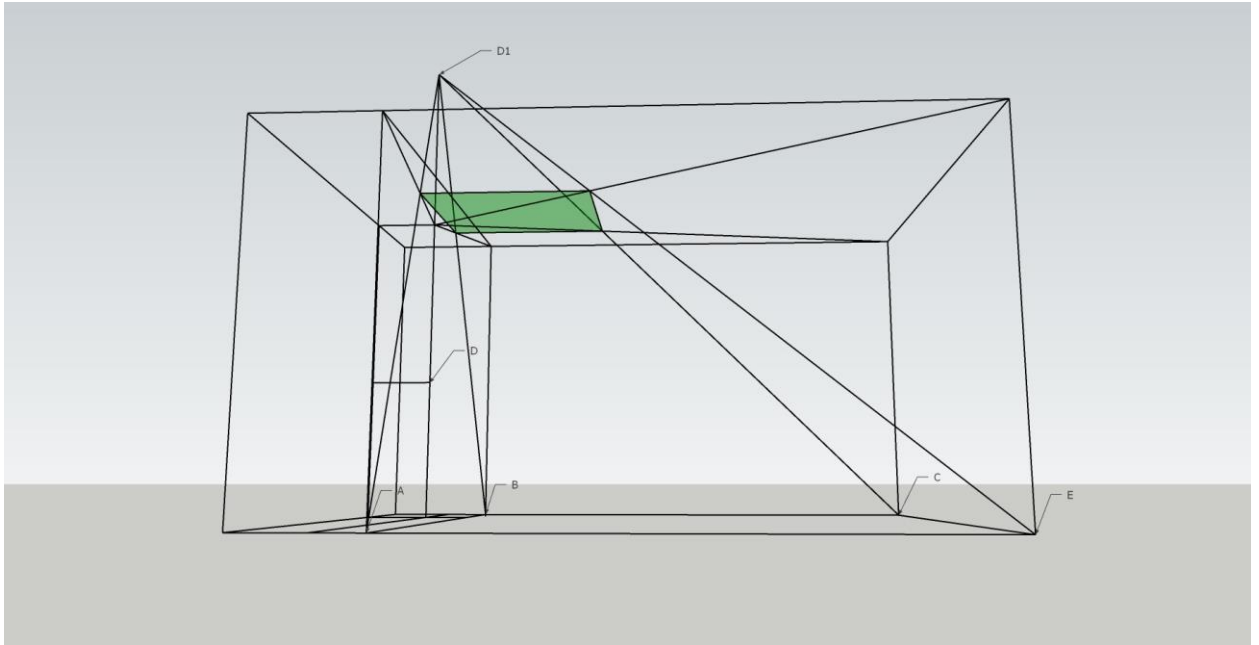
3. Відбиття від фронтальної стінки



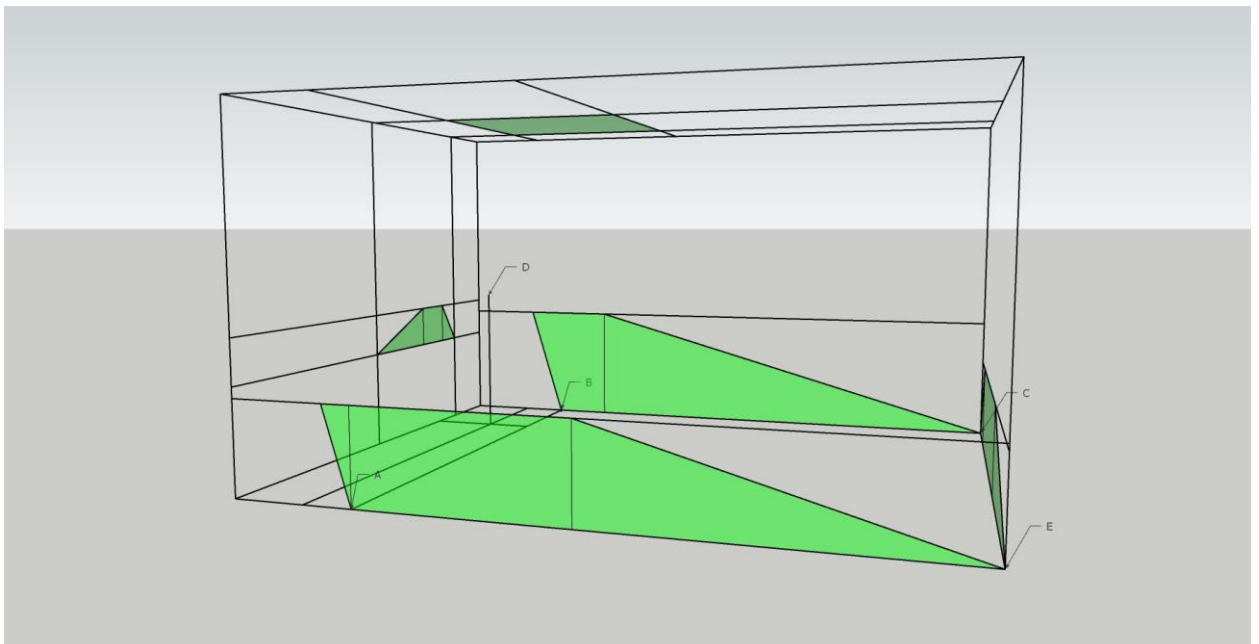
4. Відбиття від задньої стінки



5. Відбиття від стелі

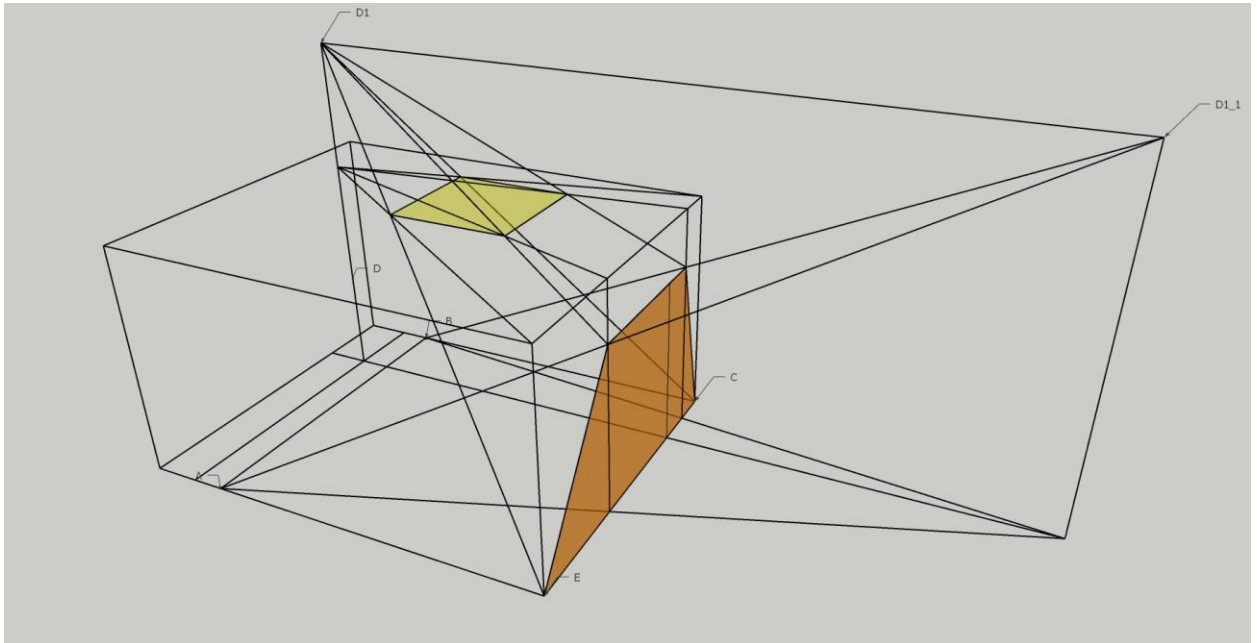


6. Усі разом

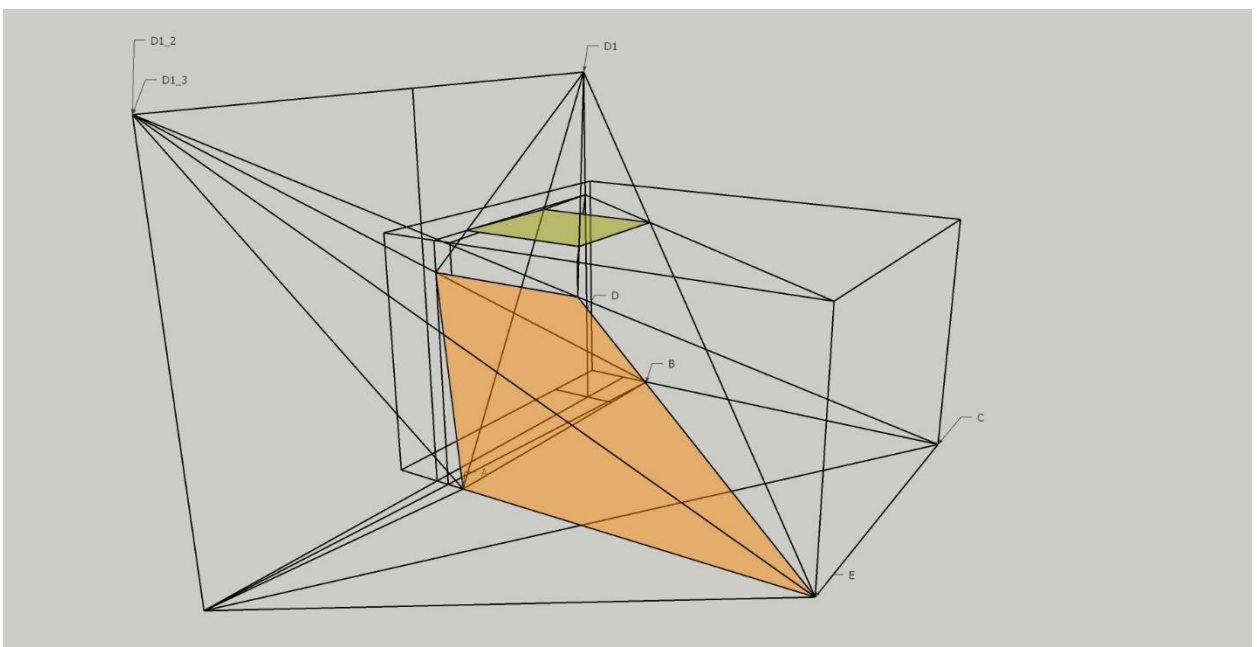


Другі перевідбиття

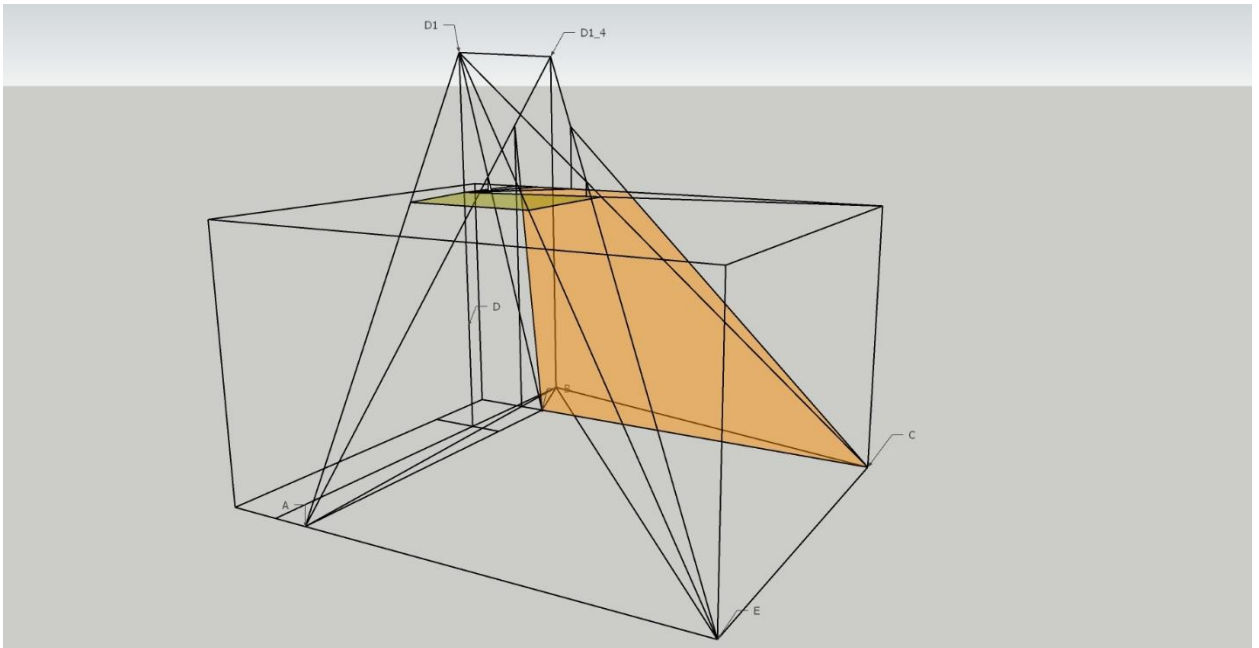
1. Стеля – Права стінка



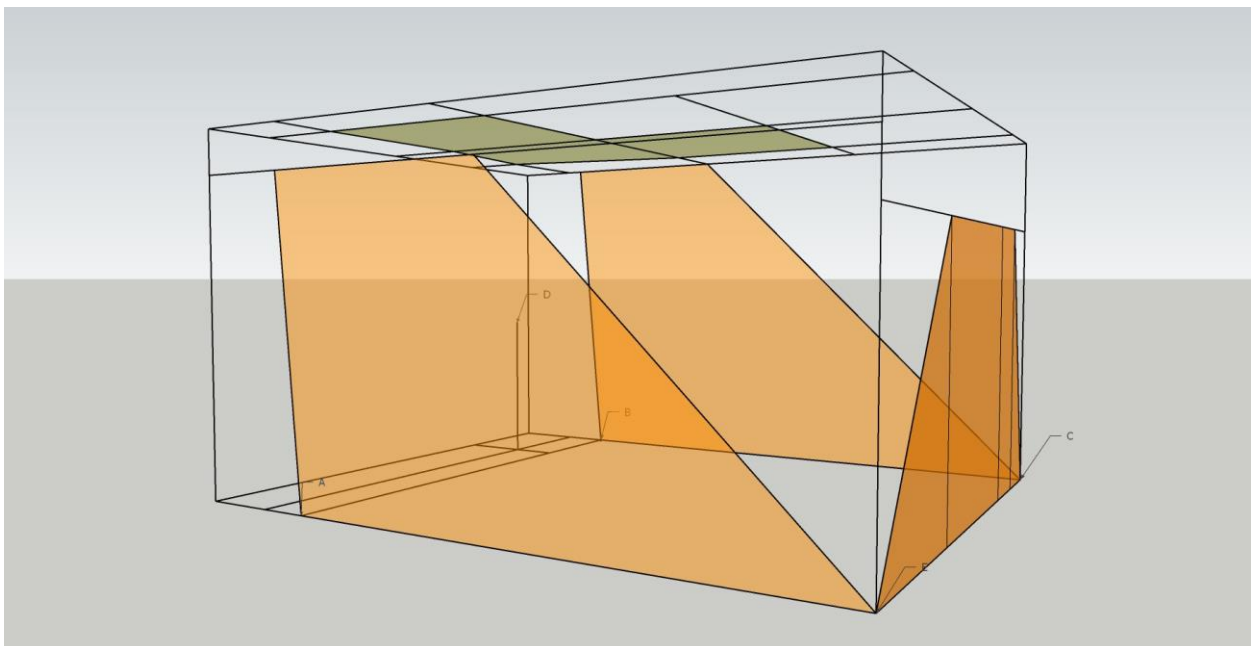
2. Стеля – Фронт. стінка



3. Стеля – Задня. стінка



4. Усе разом.



3.4 Енергетичні характеристики залу

Об'єктивна оцінка акустичної якості залу, передбачає визначення ряду об'єктивних критеріїв, які слід враховувати для забезпечення належного звучання залу. Окрім часу реверберації, до них сучасна архітектурна акустика відносить і ряд енергетичних параметрів, які характеризують енергію перших відбиттів, що надходить до слухача. Одним з таких критеріїв є індекс ясності звуку C_{80} , дБ, що визначається згідно з формулою:

$$C_{80} = 10 \lg \frac{\int\limits_{-\infty}^{80\text{мс}} p^2(t) dt}{\int\limits_{80\text{мс}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (3.5)$$

де $p(t)$ - звуковий тиск, в приміщенні після імпульсного збудження звукового поля.

Індекс ясності характеризує відношення енергії ранніх відбиттів звуку до енергії пізніших відбиттів, які визначають гулкість приміщення. Вибір межі між ранньою енергією та пізньою в індексі ясності обумовлений тим, що відбиття з запізненням до 80 мс підвищують ясність, прозорість звучання [6]. При цьому за перші 80 мс до слухача повинна надходити значна частина звукової енергії, яка дозволяє йому вірно сприйняти інформацію. Оптимальні значення індексу ясності лежать в межах від 2 дБ до 6 дБ. При значеннях індексу більше за 6 дБ музична програма сприймається досить «сухо», а при значеннях менших за 2 дБ буде занадто велика гулкість приміщення.

Значення індексу C_{80} для різних точок вимірювання в залу відповідність оптимальним величинам наведені в таблиці 3.2.

Другим критерієм для об'єктивної оцінки акустичної якості залів є індекс реверберації R_{50} , що визначається згідно з формулою [7]:

$$R_{50} = 10 \lg \frac{\int_{50\text{ін}}^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{50\text{ін}} p^2(t) dt}, \quad (3.5)$$

де $p(t)$ - те саме, що у формулі (3.5).

Існує залежність, яка описана в літературі [7] та підтверджена дослідями, що для злів універсального призначення індекс реверберації має знаходитися в межах $4 \div 0$ дБ.

Значення індексу реверберації R_{50} в точках вимірювання наведені в таблиці 3.2.

Також досить наглядним засобом для аналізу перших, найбільш важливих для правильного сприйняття інформації відбиттів,

Точка Вимірювання	Енергетичний параметр, дБ	
	C80	R50
1	6,655	2,599
2	6,64	3,39
3	6,691	2,201
4	6,803	3,9688
5	6,424	0,5126
6	6,3699	0,5911
7	6,595	2,824
8	6.2	4,0245

3.5 Звукоізоляція приміщення.

Акустичні умови в залі в значній мірі визначаються також рівнями шуму завад як від зовнішніх, так і від внутрішніх джерел. Високі рівні стороннього шуму погіршують і можуть зробити неможливим нормальне сприймання слухачами музичних та мовних програм, а також є завадою і для виконавців.

Рівні шуму в залах регламентуються вимогами, наведеними в нормативному документі – СніП-ІІ-12-77 [4]. Значення допустимих рівнів шуму для залів наведені в таблиці 2.6 (п.1-2), при цьому загальний рівень звуку завади в залі для глядачів не повинен перевищувати 35 – 40 дБА, а при проведенні в залі запису концертних програм вимоги до шумових завад стають ще більш жорсткими.

Назва перегородки	Звукоізоляція R_w
Стіна цегляна 90 см	63 дБ
Стіна цегляна 41 см	56 дБ
Підлога залізобетонна	53 дБ
Стеля складна 20 см	42 дБ

Внутрішніми джерелами шуму в приміщенні є репетиційні і службові приміщення, та вбиральня.

До зовнішніх джерел шуму слід віднести шум натовпу та інших клубів.

Маючи на увазі ширину стін, рівень звукопоглинання та відстань до найближчих жилих будинків 270 метрів та те що фабрика знаходиться поміж гір та лісосмуг то звук зовсім не доходить до жилих будинків. Та враховуючі також стіни в інші приміщення фабрики то між клубами нічого не чути.

Рекомендацій по звукоізоляції не має.

3.6 Рекомендації.

Комплекс проведених натурних вимірювань дозволив визначити об'єктивні акустичні характеристики основного залу клубу.

Аналіз отриманих результатів дає можливість зробити наступні висновки.

1. Основні геометричні розміри залу і їх пропорції знаходяться в оптимальних межах. При об'ємі залу $V \approx 358 \text{ м}^3$ питомий повітряний об'єм на людину становить $V_0 = 5 \text{ м}^3$, що знаходиться в межах рекомендованих значень ($4 - 6 \text{ м}^3$ на одне місце). Рекомендованою кількістю глядачів є 90 людей.
2. Час реверберації, як одна з основних акустичних характеристик залу, характеризується значеннями:
 - в діапазоні низьких частот ($125 - 250 \text{ Гц}$) – $T_{н.ч.}=0,78-0,8\text{с}$;
 - в діапазоні середніх частот ($500 - 1000 \text{ Гц}$) – $T_{с.ч.}=0,62\text{с}$;
 - в діапазоні високих частот ($2000 - 4000 \text{ Гц}$) – $T_{в.ч.}=0,3-0,4\text{с}$.

І це не враховуючи наповненість залу. При наповненні зал буде сильно переглушений. Звук буде занадто глухий.

Рекомендується зняти акустичні пастки зі стелі.

Приведення часу реверберації для оптимального звучання електронної музики ($T_{опт}=0.6\div 0.8\text{с}$) вимагатиме незначні конструктивні зміни у внутрішньому оздобленні залу.

3. Енергетичні параметри звукового поля, визначені за результатами проведених вимірювань, характеризують якість звучання, особливо це має значення для музикальних залів, де ясність і прозорість звучання дуже важливі. Значення індексів C_{80} і R_{50} знаходяться в інтервалах

$C_{80}(6.2-6.69)$ і $R_{50}(0.5126-4.0245)$, що слід вважати не прийнятним для показника R_{50} з урахуванням призначення залу.

4. Звукоізоляція залу на час проведення акустичних досліджень була достатньою. Рівні шумових завад від внутрішніх, так і від зовнішніх джерел не перевищували допустимих значень, встановлених нормативними документами.
5. Проведені вимірювання акустичних характеристик показали, що основними недоліками залу театру є:
 - Занижені значення часу реверберації
 - Невірна структура звукових відбиттів
6. В подальшому при ремонті, необхідно здійснити ряд рекомендованих заходів по покращенню акустичних умов в залі клубу як для відвідувачів, так і для виконавців.

ВИСНОВОК

Дана бакалаврська робота присвячена вивченню акустичних параметрів приміщень для різного цільового призначення та їх проектуванню. Метою роботи є покращення акустичних характеристик клубу.

Для оцінки якості звучання приміщень різних форм і призначення та вибору оптимальних параметрів було опрацьовано та проаналізовано різноманітні літературні джерела по прикладній акустиці.

Розраховане стандартне значення часу реверберації на низьких частотах відповідає допустимим величинам, а на середній і високих частотах є значно меншим від оптимальних значень. В результаті роботи було запропоновано зняти акустичні звукопоглинальні панелі із базальтової вати, таким чином зменшивши поглинання в області середніх та високих частот.

Була розрахована звукоізоляція огорожень приміщення яка показала що найменшою ізоляцією володіє покрівля приміщення, однак даний недолік не спричинить великих проблем оскільки оторуючі будинки з нормованими рівнями шуму розташовуються на відстані не менше 600 м від об'єкта, що розглядається.

Рекомендованою кількістю глядачів в залі є 90 людей.

Час реверберації в приміщенні:

- в діапазоні низьких частот (125 – 250 Гц) – $T_{н.ч.}=0,78-0,8с$;
- в діапазоні середніх частот (500 – 1000 Гц) – $T_{с.ч.}=0,62с$;
- в діапазоні високих частот (2000 – 4000 Гц) – $T_{в.ч.}=0,3-0,4с$.

є занадто малий в порівнянні з оптимальними величинами $T_{опт}=0.6\div 0.8с$

Енергетичні параметри:

- $C_{80}(6.2-6,69)$
- $R_{50}(0,5126-4,0245)$

знаходяться в межах допустимих величин.

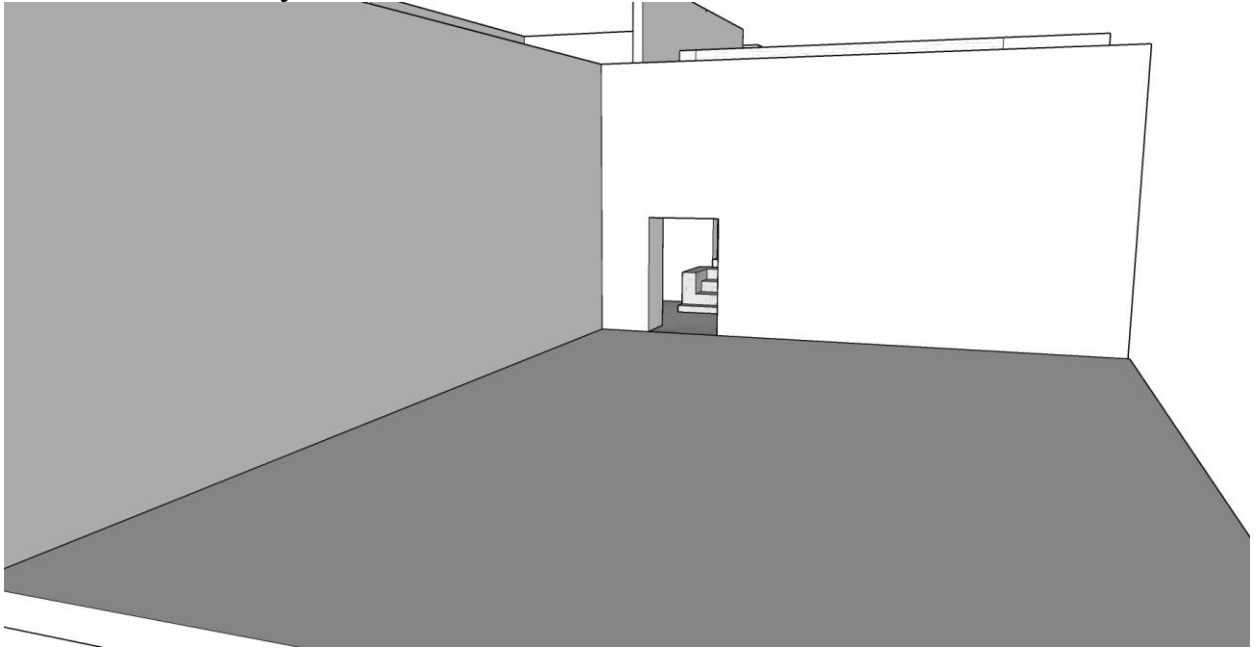
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Акустика: Справочник / под ред. М.А. Сапожкова. - М.: Радио и связь, 1989.-336 с
2. Дідковський В.С., Луньова С.А., О.В. Богданов. Архітектурна акустика Навчальний посібник – НТУУ «КПІ» (ФЕЛ) – 2012 – 383с.
3. С.Д. Ковригин. Архитектурно-строительная акустика : учеб. Пособие для студентов строит. спец. вузов - М. : Высш. шк., 1980. - 184 с.
4. Справочник по защите от шума и вибраций жилых и общественных зданий/ Под редакцией Заборнова В.И. – К: Будівельник. – 1989. - 305с.
5. Электроакустика и звуковое вещание / Под ред. Ю.А. Ковалгина. – М.: Горячая линия – Телеком . – 2007. - 872 с.
6. Алдошина И.А, Приттс Р. Музыкальная акустика – С.-П.: Композитор, 2006. – 719 с.ц
7. Анерт В., Райхард В. Основы теории звукоусиления. Пер. «Радио и связь» М., 1984 г.
8. Дідковський В.С., Луньова С.А. Основи архітектурної та фізіологічної акустики. – К.: Аванпостприм. – 2001. - 422с.
9. Акустичний розрахунок приміщень. Методичні вказівки до курсової роботи з дисципліни “Прикладна акустика” для студентів спеціальності
“Акустичні засоби і системи” всіх форм навчання / Уклад.: С.А. Лунева, В.Т. Мацапура. - Київ: НТУУ “КПІ”, 2006.- с.51
10. Боголепов И.И. Промышленная звукоизоляция.– Л.:Судостроение.- 1986. - 295с
11. Дидковский В.С., Карачун В.В. Основы динамики ограждающих конструкций - К.: "Будівельник", 1995
12. Методичні вказівки з дисципліни “Прикладна акустика” - К.: НТУУ “КПІ” – 46

Додаток А

Зображення клубу у П.3. SketchUp

1. Вид з «вулиці»



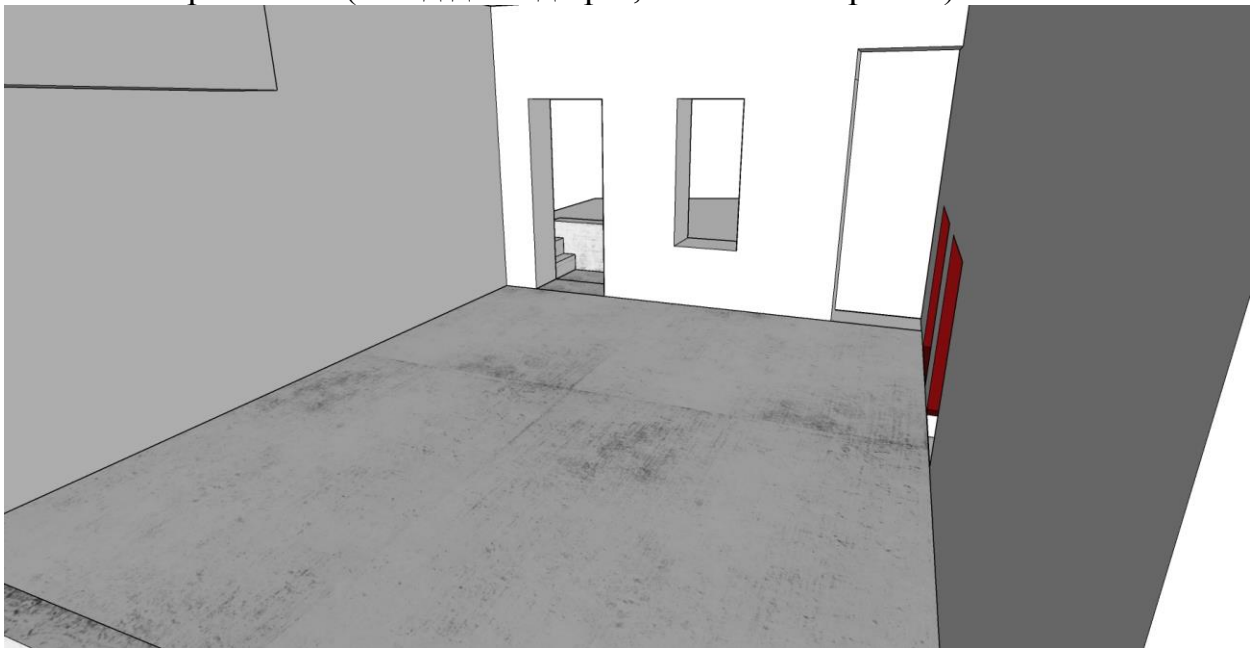
2. Вид зверху



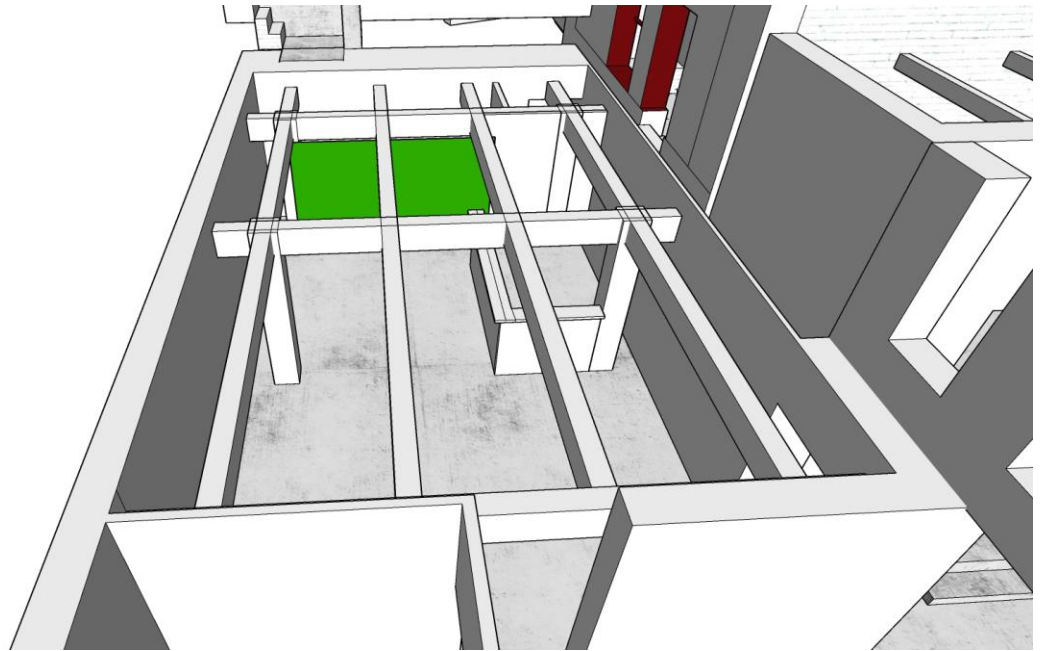
3. Основний зал



4. Верхній зал (вихід до подвір'я, зазвичай закритий)



5. Підвальний зал, вид зверху (знаходиться під верхнім залом)



6. Підвальний зал (екран для проектування зелений)

